

Cherche source des rayons cosmiques... désespérément

Ludwik M. Celnikier

DAEC, Observatoire de Paris-Meudon, 92 Meudon, France

Celnikier@mesio.observatoiredeparis.fr

Les rayons cosmiques

A la fin d'un siècle si fertile en grandes découvertes scientifiques, étonnamment, des observations qui datent de plus de 80 années sont encore aujourd'hui objets de spéculations et de controverses.

C'est, en effet, le cas du rayonnement cosmique, du moins de la partie la plus extrême de son spectre d'énergie. Les observations du physicien autrichien Victor Hess, à l'aide d'un électroscope embarqué en ballon, datent effectivement de 1912. Elles concernent un "rayonnement" dont le pouvoir d'ionisation augmente avec l'altitude, et dont la nature restera inconnue jusqu'aux années trente. D'ailleurs Robert Millikan soutenait la thèse selon laquelle la partie extrême du spectre se décomposait en "bandes", qui correspondaient assez bien aux énergies de formation des noyaux massifs (la partie basse énergie du spectre étant manifestement liée à la présence de matières radioactives dans la croûte terrestre). A partir de l'idée d'Einstein de l'équivalence masse-énergie et, en l'absence de toute corrélation avec un quelconque objet astrophysique, les plus énergiques des rayons cosmiques pouvaient être associés à la nucléosynthèse cosmologique durant des périodes très antérieures.

Graduellement, ce "rayonnement" se révèle être des particules massives, essentiellement les noyaux des éléments ordinaires complètement ionisés, avec un petit pourcentage d'électrons. L'exploitation d'appareils embarqués en satellite a permis d'étudier ces particules directement plutôt que par l'effet de leurs sous-produits sur les électroscopes, et notamment de bien mesurer leur spectre d'énergie. Jusqu'à 10^{10} eV/particule, le champ magnétique solaire perturbe fortement la propagation du rayonnement cosmique. Aux énergies plus élevées, le flux différentiel j en fonction de l'énergie E suit une loi de puissance du type $dj/dE = E^q$, l'indice q valant environ $-2,5$ (mais voir plus loin). Il a fallu enfin attendre les années 70 pour découvrir que les rayons γ faisaient partie du rayonnement cosmique.

Si les techniques spatiales sont très bien adaptées jusqu'à une énergie d'environ 10^{14} eV/particule, elles doivent par contre être abandonnées pour les énergies plus élevées car le flux au-delà de 10^{15} eV/particule devient si faible qu'il faudrait se contenter d'un taux de comptage ridiculement bas, ou pouvoir mettre en orbite des détecteurs monstrueux. Heureusement, une méthode proposée par Pierre Auger s'applique admirablement à ces énergies. Une particule énergétique qui

entre dans l'atmosphère terrestre crée des particules secondaires qui, elles-mêmes, produisent d'autres particules et ainsi de suite. A mesure qu'une telle "gerbe" pénètre l'atmosphère et, tant que certains seuils d'énergie ne sont pas atteints, le nombre de particules secondaires s'accroît et l'énergie de chacune diminue. Ainsi une particule initiale de 10^{19} eV se manifeste, au niveau de la mer, par environ 100 milliards de particules secondaires de faible énergie (essentiellement des photons et des électrons dans le domaine du MeV) répartis sur une surface de plusieurs dizaines de km^2 . Des détecteurs au sol (pour lesquels le problème de la taille ne se pose pas aussi dramatiquement qu'en satellite) peuvent donc "échantillonner" ces queues de gerbes. Des algorithmes relativement simples permettent, par la mesure du nombre de particules et leurs temps d'arrivée, de reconstruire assez précisément l'énergie et la direction de la particule incidente. Des méthodes plus délicates sont nécessaires pour l'identification de la particule primaire: ce problème est presque aussi difficile que celui de trouver le propriétaire d'une montre cassée dont on a récupéré quelques fragments dans la rue.

Une autre technique (optique) offre une solution alternative à la détection et iden-

tification de la gerbe. En effet, le passage de la gerbe excite dans l'atmosphère une raie d'azote qui se trouve dans l'ultra-violet proche et à laquelle une atmosphère sèche est relativement transparente. L'émission de lumière fluorescente qui en résulte, qui peut être détectée par des phototubes adaptés, contient également des informations précises qui permettent de remonter à l'origine de la gerbe. Il n'est pas sans intérêt de rappeler que ce processus est qualitativement similaire à la production de couches ionisées de Chapman par le rayonnement ultra-violet et X solaire. Toutefois, cette technique ne fonctionne que la nuit et exige un ciel très transparent, sans nuage et sans lune, ce qui réduit évidemment son rendement. Néanmoins, elle est très puissante et, quand elle peut être utilisée, l'identification de la particule primaire est beaucoup plus fiable qu'à l'aide de réseaux de détecteurs. Le "Fly's Eye" (Œil de Mouche), un détecteur développé par une équipe de l'Université d'Utah, est pour l'instant le seul dispositif de ce type [1,2].

Les rayons cosmiques ultra-énergiques

Les réseaux de détecteurs et le Fly's Eye nous ont permis d'étendre le spectre de rayons cosmiques jusqu'au domaine des 10^{20} eV. L'énergie de la particule la plus énergétique connue à ce jour (détectée par le Fly's Eye [3,4]) était légèrement supérieure à $3 \cdot 10^{20}$ eV, ce qui correspond, soit dit en passant, à un peu plus de **50 joules**. Les résultats de ces expériences soulèvent diverses questions [5,6]. La densité d'énergie des rayons cosmiques dans le voisinage de la Terre est de l'ordre de 1 eV/cm^3 ; cela est comparable à la densité d'énergie de la lumière stellaire, mais il ne faut pas perdre de vue que l'énergie moyenne par particule est, bien sûr, beaucoup plus élevée que l'énergie moyenne par photon. Au-delà de 10^{10} eV/particule environ (où les effets du champ magnétique solaire s'estompent), le spectre différentiel se présente sous la forme de trois lois de puissance d'indices similaires. Jusqu'à 10^{16} eV environ, la valeur de l'indice est d'environ $-2,7$, devenant environ -3 jusqu'à une énergie de l'ordre de 10^{19} eV; aux énergies les plus élevées, le spectre semble s'aplatir. Aux alentours de 10^{16} eV, le spectre est parfaitement continu, sans aucun décrochement évident: on conclut que les particules dans la gamme énergétique 10^{10} - 10^{19} eV sont produites par un seul mécanisme ou par deux mécanismes apparentés, à moins d'invoquer un processus *ad hoc* qui pourrait accorder deux mécanismes indépendants. Par contre, l'aplatissement éventuel du spectre aux énergies extrêmes offre la possibilité qu'intervient là un nouveau processus.

Jusqu'à quelques 10^{16} eV, les rayons cosmiques contiennent dans l'ensemble tous les éléments dans leurs rapports habituels, avec toutefois un enrichisse-

ment en éléments lourds. Cela se comprend facilement, car les rayons cosmiques traversent la matière interstellaire et induisent des réactions nucléaires; d'ailleurs, cet enrichissement peut être exploité pour estimer la durée du passage des rayons cosmiques entre la source et nous. Cependant, au-delà de quelques 10^{18} eV, la composition chimique "s'allège"; si, à l'heure actuelle, nous ne pouvons pas éliminer définitivement les rayons γ comme candidats aux énergies les plus élevées (mais voir [4]), l'hypothèse la moins invraisemblable est que ces particules sont des protons (les neutrinos ne peuvent être exclus, mais cela est peu plausible pour d'autres raisons). Le problème n'est pas sans piment: dans le cas de l'événement le plus énergétique, celui observé par le Fly's Eye, le profil fluorescent de la gerbe ne fournit pas assez d'information pour éliminer l'hypothèse d'un noyau lourd.

Enfin, il y a une indication [7] d'un "trou" dans le spectre à une énergie légèrement en dessous de 10^{20} eV; si cela était confirmé, on pourrait prendre au sérieux l'idée que les rayons cosmiques ultra-énergiques sont produits par un processus jusqu'alors inconnu. Mais n'oublions pas que seulement 40 événements environ ont été observés au-delà de $5 \cdot 10^{19}$ eV et 8 au-delà de 10^{20} eV.

Les sources

Deux classes génériques de mécanismes peuvent être à l'origine de particules chargées très énergiques dans le Cosmos, sans se replier sur la théologie. L'un est merveilleusement adapté à la production d'un spectre en loi de puissance; l'autre est une excellente source de particules de très hautes énergies, mais sans garantie que le spectre va suivre une loi de puissance. Pour que le spectre suive une loi de puissance, deux critères doivent être vérifiés. D'une part, les rayons cosmiques doivent être confinés dans un volume d'espace, d'où ils tirent leur énergie de telle manière que l'augmentation énergétique est une fonction croissante de l'énergie instantanée. D'autre part, et très raisonnablement, les particules doivent pouvoir quitter le volume "actif" dès qu'une énergie critique a été atteinte.

Il y a déjà longtemps, Enrico Fermi a montré qu'une particule chargée piégée entre des discontinuités magnétiques mobiles gagne d'autant plus d'énergie que son énergie est grande. En plus, quand son énergie est si grande que son rayon de Larmor est comparable à la dimension caractéristique du volume dans lequel la particule est confinée, elle va nécessairement s'échapper. La manière la plus simple d'appliquer la théorie de Fermi est d'exploiter la notion d'équipartition de l'énergie. On suppose tout d'abord qu'il y a équipartition d'énergie entre le champ magnétique et le plasma turbulent qui le contient et que les

particules à accélérer restent piégées pendant un temps suffisamment grand pour qu'elles atteignent un état d'équipartition d'énergie avec le champ magnétique. En supposant enfin que le système perd de l'énergie seulement parce que les particules les plus énergiques s'en vont (mais avec une échelle de temps plus grande que le temps nécessaire pour rétablir l'équipartition), on montre très facilement [8] qu'à l'état d'équilibre le spectre différentiel suit une loi de puissance, dont l'indice est exactement $-2,5$. Voici donc une bonne nouvelle: le spectre observé du rayonnement cosmique pourrait être le produit d'un processus très général. Mais la mauvaise nouvelle est que ce résultat théorique, si proche de ce que l'on observe, s'en distingue de manière assez fondamentale. En effet, comme nous l'avons vu au début, le spectre observé est composé d'au moins trois lois de puissance, les indices étant fonction de l'énergie. On conclut alors qu'au cours de l'accélération des particules, l'équipartition parfaite de l'énergie n'est pas maintenue, et il est nécessaire de remplacer une théorie générale simple par des modèles complexes adaptés à chaque cas. Ceux-ci dépendent essentiellement de deux paramètres:

-l'échelle de temps t_a qui correspond à l'accélération par le mécanisme "boules de billard" de Fermi, et

-l'échelle de temps t_l pour quitter le volume actif, par exemple par quelque processus de diffusion.

Avec ces paramètres, on démontre (mais avec davantage de difficulté [8]) que l'indice de la loi de puissance qui en résulte est égale à $-(1 + t_a/t_l)$. Il est évident que différentes réalisations de modèles de la région où se fait l'accélération donnent différentes valeurs de l'indice, de sorte que la plupart des modèles peuvent être ajustés pour s'accorder avec les indices observés. Toujours est-il que les modèles de ce type les plus élémentaires mènent en général aux indices bien plus éloignés de la réalité que la théorie d'équipartition qui brille par sa simplicité, mais dont le résultat paraît presque miraculeux (mais n'est-ce pas la nature de miracles ?).

Des conditions qui permettent d'accélérer les particules selon ce type de processus sont créées [9], par exemple, par le champ magnétique du Soleil, par les ondes de choc de supernovae, par les ondes de choc qui précèdent des objets compacts qui se déplacent à une vitesse relativiste dans le milieu interstellaire ou intergalactique, les chocs dus au mouvement de galaxies ou amas de galaxies dans le milieu intergalactique, les jets provenant de certaines galaxies radio, ainsi que leurs extrémités (appelées "lobes" par les radio astronomes) et enfin diverses combinaisons de toutes ces structures. Cependant, quels que soient les détails du processus, pour qu'il réussisse la particule doit rester piégée dans la région où l'accélération est réalisée, ce qui implique que le rayon de Larmor de la particule soit

inférieur à la dimension caractéristique R de la région. Il s'ensuit que l'énergie T d'une particule de charge Ze ne peut pas dépasser une valeur limite :

$$T < ZeBR \quad (1)$$

où B est la valeur caractéristique à grande échelle du champ magnétique qui maintient la particule dans le volume.

On peut aussi exploiter le champ électrique intense créé par une dynamo homopolaire; ce processus est alors complètement différent du mécanisme de Fermi. Supposons [8] que sur une distance caractéristique R un champ magnétique B se déplace à vitesse v_B . La valeur du champ électrique ainsi induit est de l'ordre de $v_B B/c$, et donc une particule de charge Ze peut atteindre une énergie T telle que :

$$T < ZeBRv_B/c \quad (2)$$

L'énergie est d'autant plus grande que le champ et la vitesse sont grandes; les étoiles à neutrons constitueraient d'excellentes dynamos en dépit de leur petite taille, car les champs peuvent atteindre 10^{12} G et les vitesses sont relativistes.

Autres candidats, les noyaux de galaxies actives pourraient éventuellement aussi jouer le rôle de "dynamos-accelérateurs", car il est communément admis que ces objets abritent des trous noirs d'un milliard de masses solaires, attirant la matière et le champ magnétique de la galaxie environnante. Cependant, bien que la performance de ces "dynamos-accelérateurs" soit (dans un premier temps, mais voir plus loin) limitée par le champ magnétique disponible, nous ne savons pas comment les modéliser pour que les particules accélérées aient finalement un spectre en loi de puissance. Nous savons que le rayonnement de freinage (bremsstrahlung) émis par la matière qui se trouve dans le voisinage immédiat des pulsars (les étoiles à neutrons "visibles") a un spectre en loi de puissance et donc, si on est favorablement disposé, on peut admettre que les "dynamos-accelérateurs", en général, ont un moyen de produire des particules avec un spectre en loi de puissance, même si pour l'instant nous ne comprenons pas comment ils font.

Nous ne savons pas *a priori* si les rayons cosmiques observés sont d'origine galactique ou non. Toutefois, leur source ne peut pas se trouver au-delà d'une certaine distance limite, car le rayonnement cosmologique omniprésent à 3K enlève de l'énergie à toute particule chargée qui le traverse, avec une conséquence qui se comprend très facilement. En effet [8], dans le référentiel d'un proton, par exemple, ayant un facteur de Lorentz γ , l'énergie d'un photon du rayonnement fossile est de l'ordre de $6.10^{-4}\gamma$. Si cette énergie dépasse 200 MeV, et donc si l'énergie du proton dépasse environ 5.10^{19} eV, on assiste à la production de pions et à une réduction correspondante de l'énergie du proton. La section efficace de ce processus est connue et elle mène

à la conclusion qu'aucun proton plus énergétique que 7.10^{19} eV ne peut nous arriver d'une distance supérieure à quelques dizaines de Mpc. On appelle cette coupure "la limite de Greisen-Zatsepin-Kuzmin": si dans la région ultra-énergétique du spectre, les rayons cosmiques sont effectivement constitués de protons, et, si leur source se trouve au-delà de cette distance limite, le spectre devrait s'arrêter vers 7.10^{19} eV, ou devrait avoir un trou, la source des protons plus énergétiques encore étant obligatoirement relativement proche.

Le rayonnement du fond du ciel a un autre effet sur la propagation de rayons cosmiques, mais dont l'importance n'est pas très claire. En principe, tout noyau ultra-énergétique qui traverse ce champ de rayonnement sera graduellement "érodé" par la photodissociation: environ 4 nucléons vont être perdus par Mpc. Donc, un proton de 10^{20} eV qui arrive chez nous aurait pu être le "débris" d'un noyau de fer, par exemple, qui avait commencé son voyage à une distance de 50 Mpc. Grâce à ce phénomène, le volume contenant les sources potentielles augmente légèrement (mais constitue néanmoins la banlieue de notre galaxie); on conclut aussi que l'on ne devrait pas pouvoir observer de noyaux ultra-énergétiques en provenance de telles sources. Une autre conséquence de la photodissociation serait d'adoucir la coupure de Greisen-Zatsepin-Kuzmin: la forme détaillée du spectre d'énergie dans les environs de 10^{20} eV est une source d'informations précieuses sur les mécanismes qui sont à l'origine des particules ultra-énergétiques observées.

Il n'est pas inutile de souligner que des effets similaires doivent être à l'ordre du jour dans toute région compacte où la température et la densité volumique de photons sont très élevées — les particules de très haute énergie auront beaucoup de mal pour en sortir "indemnes".

Enfin, le même genre de phénomène limite le parcours des rayons γ d'énergies au-delà de quelques centaines de TeV (interactions inélastiques avec le rayonnement à 3K ou les infra-rouges) à également quelques dizaines de Mpc. Finalement, seuls les photons de faible énergie et (bien sûr) les neutrinos peuvent nous atteindre après de très grandes distances parcourues. Ces derniers, en particulier, doivent être strictement identifiés pour bien comprendre ce que nous observons.

Les équations (1) et (2) sont fonction de la charge nucléaire Ze . Il s'ensuit qu'à l'aide d'une "technique" donnée, il est plus "facile" d'accélérer jusqu'à une énergie particulière les noyaux lourds que les protons — on voit ainsi encore une fois l'importance d'identifier la nature du rayon cosmique primaire. Comme ces deux équations se ressemblent, nous pouvons étudier la "performance" de différents accélérateurs de façon unifiée: il suffit de trouver quelle combinaison de champ

magnétique, de taille et de vitesse correspond aux rayons cosmiques les plus énergétiques. On conclut aisément (un résumé très clair sous forme de diagramme a été proposé par Hillas [10]) que les chocs des restes de supernovae, les mouvements turbulents à l'intérieur de notre galaxie etc. sont incapables d'accélérer des particules au-delà de 10^{16} eV environ; par contre, pour produire la densité énergétique observée de rayons cosmiques, il suffit de pouvoir transformer une petite fraction de l'énergie mécanique des supernovae de notre galaxie. Ces dernières peuvent donc expliquer l'énergie totale du rayonnement cosmique, sans toutefois être responsables de la composante la plus énergétique. Pour cela, il faut invoquer soit le choc produit par un éventuel vent galactique (de tels vents sont, en effet, observés dans d'autres galaxies), soit l'effet dynamo des étoiles à neutrons qui restent après les explosions de supernovae. Le premier de ces processus serait en pratique un moyen de relancer les particules d'énergie plus faible vers les hautes énergies, et donc on s'attend à ce que le spectre soit continu aux alentours de 10^{16} eV; malheureusement, on ne peut pas ainsi produire des particules plus énergétiques que 10^{19} eV environ. Par contre, les étoiles à neutrons peuvent en théorie accélérer les particules jusqu'à 10^{20} eV; de plus, comme il s'agit des produits des supernovae, dont les restes seraient responsables des particules aux énergies plus faibles, il n'est pas déraisonnable d'admettre une continuité spectrale aux environs de 10^{16} eV. Cette hypothèse a cependant un côté *ad hoc*, car nous ne savons pas comment serait produit par ce moyen un spectre en loi de puissance. D'ailleurs, aussi séduisantes que puissent être les étoiles à neutrons comme accélérateurs surpuissants de particules, elles souffrent d'un défaut éliminatoire, car la valeur élevée de leur champ magnétique, source de leur puissance, est aussi une caractéristique nuisible. En effet, les particules nouvellement accélérées doivent traverser ce même champ, de sorte qu'elles vont perdre une partie importante de leur énergie par bremsstrahlung.

On s'attend à ce que les "moteurs centraux" de galaxies actives puissent accélérer les protons jusqu'à 10^{20} eV environ (idée basée presque exclusivement sur des considérations générales concernant les dimensions de tels objets, les champs magnétiques dans leurs voisinages et les énergies disponibles; on ne sait pas évaluer les processus qui seraient responsables du transfert d'énergie lui-même). Cependant, les protons les plus énergétiques que nous observons (s'il s'agit de protons) ne viennent pas directement de ces "centrales" galactiques: nous savons que les noyaux de galaxies actives sont entourés d'un champ de rayonnement très intense et chaud, de sorte que les particules les plus énergétiques vont perdre l'essentiel de leur énergie avant de sortir de la source à cause de la photoproduc-

tion de pions (essentiellement le processus qui est responsable de la coupure Greisen-Zatsepin-Kuzmin à l'échelle cosmologique). Bien sûr, les noyaux de galaxies actives doivent aussi être sources de noyaux lourds énergiques, car le voisinage d'un trou noir doit être "pollué" par tous les éléments. On peut donc imaginer que la photodissociation par le champ de rayonnement autour du trou noir et par le rayonnement du fond du ciel sur le trajet vers nous enlève des nucléons sumuméraires, laissant à la fin juste les protons ultra-énergiques. Alors, en aucun cas, on ne devrait pouvoir observer des noyaux lourds ultra-énergiques. De toute façon, les paramètres doivent être remarquablement bien ajustés afin que les processus enlèvent juste les nucléons en trop, sans en même temps diminuer l'énergie du proton survivant, et les sources de ce type doivent être à des distances inférieures à 30-50 Mpc. Soulignons encore l'importance de pouvoir identifier sans ambiguïté la nature des rayons cosmiques ultra-énergiques.

Des amas de galaxies riches et compacts pourraient accélérer des protons aux énergies les plus élevées, par l'intermédiaire sans doute d'ondes de choc induites par les galaxies individuelles (mais cette spéculation est d'une valeur discutable car, à l'heure actuelle, nous ne disposons que des limites supérieures sur la grandeur des champs magnétiques intergalactiques). Cependant, nous savons depuis quelque temps que, dans ces structures, la matière intergalactique est riche en éléments lourds, de sorte que leurs produits les plus énergétiques peuvent être de purs protons seulement par l'intermédiaire d'un processus de photodissociation. La photodissociation nous aide certes à comprendre l'absence apparente de noyaux lourds aux énergies les plus élevées, mais n'oublions pas qu'un noyau de fer aurait pu être à l'origine du "super-événement" du Fly's Eye. Dans une telle éventualité, il y a d'ailleurs un lourd prix à payer. Nous savons que chaque nucléon qui est détaché emporte sa part de l'énergie du noyau lourd; ainsi, par exemple, l'énergie initiale d'un noyau de fer dont un proton à 10^{20} eV atteint la Terre, a dû être au moins 5 ou $6 \cdot 10^{21}$ eV. Selon les équations (1) et (2), un accélérateur particulier peut sans doute accélérer un proton à une énergie donnée aussi facilement qu'un noyau de charge Z à Z fois cette énergie; cependant, le nombre de nucléons dans les noyaux lourds, et donc l'énergie initiale exigée croît au moins deux fois plus rapidement que la charge nucléaire. Certes, un facteur deux peut paraître comme un détail insignifiant devant l'ordre de grandeur qui sépare la réalité des modèles plausibles et calculables, mais on aurait été certainement plus content si ce facteur avait été un demi.

Les ondes de choc dans le milieu qui sépare les amas de galaxies (et qui devrait normalement être moins pollué par les produits de l'évolution stellaire) ne peu-

vent pas être éliminées *a priori* comme sources des particules les plus énergiques, même si celles-ci sont des protons; soulignons toutefois que nous avons encore moins d'information concernant la valeur du champ magnétique dans ces très grandes structures que dans les régions intergalactiques. Néanmoins, pour produire des protons de 10^{20} eV à l'aide des champs magnétiques qui ne dépassent pas les limites supérieures connues, l'échelle spatiale de ces accélérateurs éventuels doit dépasser des centaines de Mpc: on conclut que même si des protons ultra-énergétiques sont effectivement produits de cette manière, nous ne les verrons pas à ces énergies à cause de la coupure de Greisen-Zatsepin-Kuzmin. En fait, les seules structures encore capables de produire des protons de $\geq 10^{20}$ eV sans être assorties de défauts assez généraux sont les jets et chocs (les "lobes") associés à certaines radio galaxies.

Cherche désespérément...

Dans un rayon d'environ 50 Mpc, se trouve une poignée de groupes de galaxies appelée le "Groupe Local". Cette région contient aussi des radio-galaxies puissantes. L'étude de la corrélation de la direction des rayons cosmiques [2, 11, 12] avec des structures célestes est fort instructive. La distribution des directions est parfaitement isotrope jusqu'à une énergie de l'ordre de 10^{18} eV. Cela n'est pas surprenant, quelle que soit la distribution des sources: en effet, en dessous de cette énergie, le rayon de Larmor dans le champ magnétique de notre galaxie est une petite fraction de sa taille, et donc l'information concernant la direction initiale du rayon cosmique est complètement perdue. Entre 10^{18} et quelques 10^{19} eV, les directions des rayons cosmiques sont assez bien corrélées avec le plan galactique. Cela suggère que ces particules, et donc vraisemblablement les particules de plus basses énergies, sont créées dans notre galaxie.

Par contre, les rayons cosmiques les plus énergiques, jusqu'à environ 10^{20} eV, semblent corrélés avec un plan perpendiculaire à celui de notre galaxie. Or, le "Groupe Local" de galaxies constitue une structure vaguement aplatie dont le plan, que l'on appelle le plan "supergalactique" et qui contient de nombreuses radio-galaxies, est justement perpendiculaire à la Galaxie, et il est donc très tentant de lui attribuer l'honneur d'être à l'origine de rayons cosmiques ultra-énergiques. Cependant, jusqu'à présent, on n'a observé aucune coïncidence entre la direction d'un rayon cosmique et celle d'une structure spécifique au ciel. Certes, cela peut être admis en ce qui concerne les particules aux énergies inférieures à 10^{20} eV, car sur les quelques dizaines de Mpc de trajet, on s'attend à une déviation importante par le champ magnétique intergalactique; mais il est très inquiétant que les rayons cosmiques dont les éner-

gies dépassent 10^{20} eV ne sont corrélés non plus avec aucune source connue. D'ailleurs, les trois rayons cosmiques les plus énergiques, dont les déviations par rapport à leur directions initiales ne peuvent pas dépasser 10° , viennent vaguement de la direction opposée au centre galactique, mais n'ont aucune relation avec des sources énergiques ou amas de galaxies dans le groupe local: les objets qui leur sont les plus proches sur le ciel sont à des distances de 60 à 1000 Mpc, c'est-à-dire bien au-delà des distances autorisées par la coupure de Greisen-Zatsepin-Kuzmin [12]. Ces particules ultra-énergiques, ne pouvaient-elles pas être produites par une nouvelle catégorie de source, à l'intérieur du Groupe local (Greisen-Zatsepin-Kuzmin oblige), mais sans aucun rapport avec les galaxies et autres objets connus? Ne peut-on pas imaginer un mécanisme qui créerait ces particules directement avec leurs énergies très élevées, ainsi éliminant le besoin d'accélérateurs puissants cosmiques? On se demande, en effet, si l'apparent (mais statistiquement douteux) "trou" dans le spectre différentiel juste en dessous de 10^{20} eV ne serait pas justement la trace du début d'un quelconque phénomène de ce genre [7, 12]. On peut, par exemple, invoquer comme responsables les défauts topologiques [14], massifs mais spéculatifs, produits éventuels des changements de phase qui auraient suivi le Big Bang, et qui pourraient avoir une durée de vie si longue qu'ils auraient survécu jusqu'à maintenant avant de se désintégrer en particules ultra-énergiques; on peut aussi évoquer les non moins spéculatives "cordes cosmiques", qui se jettent aujourd'hui dans l'atmosphère de la Terre, avec la production des rayons cosmiques dont il est question. Mais dans l'état actuel du problème, rien n'impose ces explications avant-gardistes.

Enfin, en l'absence de meilleures idées, on cherche même à mettre en relation ces particules ultra-énergiques et les "gamma-ray-bursters"¹. Leur caractéristique commune essentielle est que nous ne comprenons rien, ni aux uns, ni aux autres. L'ombre de Millikan nous surveille, avec beaucoup d'intérêt et non sans un certain sourire narquois: son problème est toujours d'actualité, seulement décalé d'un facteur d'au moins 10^{14} vers les énergies supérieures. Millikan, lui, voyait dans ses données des bandes; nous, nous voyons (peut-être) un trou.

Vers l'ouverture d'une nouvelle fenêtre astrophysique

De toute évidence, l'étude de rayons cosmiques ultra-énergiques est sévèrement circonscrite par le manque de don-

¹ Expression anglaise consacrée; en français, cette terminologie pourrait se traduire (plus ou moins) par: sources de bouffées de rayons gamma ou sursauts gamma.

nées fiables. Dans les environs de 10^{20} eV, le flux de particules est de l'ordre de 10^{-2} événements par an et par km^2 . Si le spectre d'énergie continue vers les énergies plus élevées avec la même pente qu'aux énergies plus basses, ce taux d'événements diminue de deux ordres de grandeur vers 10^{21} eV. Dans ces conditions, il est extrêmement difficile de "cartographier" la forme du spectre aux hautes énergies. D'ailleurs, il n'y a actuellement dans l'hémisphère sud aucun détecteur de grandes gerbes, et, même dans l'hémisphère nord, le ciel n'est pas couvert de façon complète. Cela est très gênant, car le centre galactique ne peut être vu que de l'hémisphère sud, et donc la corrélation apparente des directions de rayons cosmiques ultra-énergiques avec la direction opposée au centre galactique ou avec le plan supergalactique, corrélation qui est déjà assez suspecte, pourrait très bien être une pure fluctuation statistique. Il n'est pas sans intérêt de se rappeler que les sources supraluminiques galactiques, qui constituent vraisemblablement des versions locales et miniaturisées de noyaux de galaxies actives, et pourraient très bien être une source de protons ultra-énergiques, se trouvent toutes dans la direction du centre galactique.

A l'heure actuelle, le détecteur de gerbes le plus important se trouve au Japon: c'est le réseau AGASA qui contient une centaine de détecteurs répartis sur une surface d'environ 100 km^2 . La surface de chaque détecteur, un scintillateur, est de 2 m^2 . L'unique détecteur à fluorescence est le Fly's Eye, aux Etats-Unis. Il est constitué de deux "stations" avec une séparation de 3 km; le "télescope" d'une des stations est composé de 900 photomultiplicateurs environ, et de l'autre presque 500.

"L'Observatoire Auger de Rayons Cosmiques" [13] constitue une tentative pour améliorer la qualité et la quantité de données de plusieurs ordres de grandeur. Le projet est l'œuvre d'une collaboration mondiale d'une quinzaine de pays dont la France. L'Observatoire sera composé de deux sites "hybrides": dans le comté de Millard (Utah, Etats-Unis) pour l'hémisphère Nord; près du barrage d'El Nihuil (Mendoza, Argentine) pour l'hémisphère Sud:

- chaque site aura 1600 détecteurs Cerenkov à eau, sur une surface de 3000 km^2 environ, avec une séparation de 1,5 km. Chaque détecteur sera constitué d'une cuve d'une surface de 10 m^2 et contenant 10 m^3 d'eau;

- à chaque réseau, seront associés deux ou trois (selon les détails du terrain retenu) détecteurs à fluorescence du type "Fly's Eye", qui vont couvrir le ciel avec 50 miroirs et 200 pixels par miroir.

On souhaite que ce système fonctionne pendant une vingtaine d'années, de façon la plus automatique possible et avec un minimum de maintenance. Cela entraîne un certain nombre de contraintes fortes

qui sont autant de défis à relever. Par exemple, à moins d'atteindre des coûts prohibitifs, il est exclu de "cabler" le site. Cela rend obligatoire l'utilisation de l'énergie solaire (pour alimenter les détecteurs) et de techniques proches de la téléphonie cellulaire pour le transfert des données et la communication entre détecteurs et ordinateur central. La synchronisation relative entre détecteurs, paramètre important pour la performance recherchée sera assurée avec une précision de quelques nanosecondes en faisant appel à des signaux émis par les satellites militaires GPS. Une électronique extrêmement rapide et fiable devra analyser en permanence les traces lumineuses laissées par les milliards de particules de la queue des gerbes dans les cuves, etc. Enfin, aucune équipe d'analyse ne pouvant résider en permanence sur le site-même, l'ordinateur central devra être relié par des réseaux à haut débit à l'ensemble de laboratoires collaborant à l'expérience pour permettre le pilotage en temps réel du détecteur et l'analyse physique "chez soi" aussi petits et modestes que soient les groupes participants.

Si tout se passe comme prévu, le système devrait démarrer vers l'an 2000. Après 10 ans, le réseau Auger complet aura observé plus de 1000 événements au-delà de $7 \cdot 10^{19}$ eV, dont la moitié au-dessus de 10^{20} eV (rappelons qu'on en a détecté jusqu'ici 8 en tout en 35 ans) et 5 à plus de 10^{21} eV, à condition bien sûr que les flux estimés à ce jour soient corrects. Jusqu'à 10 à 20 % de ces événements auront été observés aussi par les détecteurs associés du type "Fly's Eye".

Si rien ne garantit qu'une telle amélioration qualitative et quantitative apportera nécessairement la solution de l'énigme des rayons cosmiques ultra-énergiques, il est, par contre, certain que, dans l'état actuel, ce sujet reste la chasse gardée des théoriciens armés de spéculations les plus fantaisistes.

L'astrophysique contemporaine confronte de nombreux problèmes. L'un d'eux concerne la matière sombre, que l'on peut qualifier (certes de manière un peu provocante) comme l'étude de particules qui *devraient* exister... mais qui jusqu'à nouvel ordre, ne sont pas au rendez-vous. Les rayons cosmiques ultra-énergiques constituent le problème inverse: ce sont des particules *qui existent*... mais qui, peut-être, ne le devraient pas ■

Références

- [1] Sokolsky P. et al., Extremely High Energy Cosmic Rays, Physics Reports, **217** (1992), 224.
- [2] Sokolsky P., Cosmic Ray Observations at Extreme Energies, p.157 in *High Energy Astrophysics*, ed. J. M. Matthews, World Scientific Press, 1994.
- [3] Bird D. J. et al., Detection of a Cosmic Ray with Measured Energy well beyond the Expected Spectral Cutoff due to Cosmic Microwave Radiation, Ap. J. **441** (1995), 144.
- [4] Halzen F. et al., The Highest Energy Cosmic Ray, Astroparticle Physics, **3** (1995), 151.

- [5] Drury L. O'C., Acceleration of Cosmic Rays, Contemp. Phys., **35** (1994), 231.
- [6] Ginzburg V. L., Astrophysical Aspects of Cosmic Ray Research (first 75 years and outlook for the future), Sov. Phys. Usp., **31** (1988), 491.
- [7] Sigl G. et al., A Gap in the Highest Energy Cosmic Ray Spectrum as a Signature of Unification Scale Physics, Science, **270** (1995), 1977.
- [8] Longair M.S., *High Energy Astrophysics*, Cambridge University Press, 1981.
- [9] Biermann P. L., AGN and Galactic Sites of Cosmic Ray Origin, p. 217 in *High Energy Astrophysics*, ed. J. M. Matthews, World Scientific Press, 1994.
- [10] Hillas A. M., The Origin of Ultra High Energy Cosmic Rays, p. 277 in *High Energy Astrophysics*, ed. F. K. Lamb, Benjamin/Cummings Publishing Co. Inc., 1985.
- [11] Stanev T. et al., Arrival Directions of the Most Energetic Cosmic Rays, Phys. Rev. Lett., **75** (1995), 3056.
- [12] Sigl G. et al., On the Origin of the Highest Energy Cosmic Rays, Astroparticle Physics, **2** (1994), 401.
- [13] The Pierre Auger Project Collaboration Design Report. Fermilab, October 1995.
- [14] Bhattacharee P. et al., Grand unified theories, topological defects and ultra high energy cosmic rays, Phys. Rev. Lett., **69** (1992), 567.

Prix de l'Académie des Sciences

Le Prix Ampère de l'Electricité de France a été décerné conjointement à Cirano De Dominicis (CEA, Saclay) et à Marc Mézard (ENS, Paris) pour leurs importantes contributions à la mécanique statistique, et notamment dans la théorie des verres de spin.

Le Prix Aniuta Winter-Klein a été décerné à Jean-Marc Luck (CEA, Saclay) pour ses travaux sur les milieux désordonnés et quasi-périodiques.

Le Prix Anatole et Suzanne Abragam a été décerné à Claude Fermon (CEA, Saclay) pour ses études des propriétés magnétiques de couches minces.

Le Prix Langevin en hommage à la mémoire des savants français assassinés par les nazis en 1940-1945, en mémoire de Henri Abraham, Eugène Bloch, Georges Bruhat, Louis Cartan et Fernand Holweck, a été décerné à Alain Blondel (Polytechnique, Palaiseau) pour son rôle auprès de l'expérience ALEPH au CERN.

Le Prix Henri de Parville a été décerné conjointement à Alain Barbu, Daniel Lesueur et Annie Dunlop (CEA et Ecole Polytechnique) pour leur découverte de l'effet des excitations électroniques dans des métaux bombardés par des ions.

Le Prix Vaillant a été décerné à Françoise Brochard-Wyart (Institut Curie, Paris) pour ses travaux sur la physique des polymères et sur la dynamique des interfaces des fluides.

Le Prix Laura Mounier de Saridakis a été décerné à Christian Colliex (Physique des solides, Orsay) pour ses travaux de spectrographie des pertes d'énergie électroniques et son application à la microscopie analytique.