

Les rayons cosmiques, messagers célestes

Etienne Parizot, Institut de Physique Nucléaire, CNRS, Orsay

Au début du vingtième siècle, alors qu'ils étudiaient le pouvoir ionisant des émissions radioactives récemment découvertes, les physiciens furent intrigués par un rayonnement énergétique persistant en l'absence de sources identifiées. On l'attribua d'abord à la radioactivité naturelle des roches, mais les résultats obtenus par Viktor Hess en 1912 réduisirent cette hypothèse à néant et lancèrent les physiciens dans une aventure cosmique fabuleuse, encore inachevée. Parti en ballon avec ses instruments pour mesurer l'atténuation de ce mystérieux rayonnement avec l'altitude, le baron Hess s'aperçut en réalité qu'il ne cessait d'augmenter à mesure qu'il s'élevait ! La conclusion s'imposait : ce rayonnement ne venait pas de la Terre, mais du cosmos ! Il fut donc appelé rayonnement cosmique, mais on en ignore toujours l'origine exacte...

Un vol en ballon révolutionnaire

Nous sommes au matin du 7 août 1912, à 6h12 exactement, à Ústí, sur les bords de l'Elbe, en Bohême. Viktor Hess a chargé sa nacelle d'équipements scientifiques et s'envole enfin pour ce qui reste sans doute le vol en ballon le plus extraordinaire de toute l'histoire des sciences. En décollant, il n'est que l'un de ces physiciens fascinés par le rayonnement énergétique qui interfère ici et là avec les appareils scientifiques qu'on appelle "électroscopes" et qui, si l'on en croit les mesures récemment effectuées au sommet de la Tour Eiffel, semble plus pénétrant que n'importe quel rayonnement radioactif connu. Mais lorsqu'il atterrit quelques heures plus tard près de Pieskow, dans le Brandebourg, à 10h45, il est le seul à savoir ! Au cours de son vol, qui a culminé à 5350 mètres, il a soigneusement étudié l'intensité du flux ionisant en fonction de l'altitude, et rapporte avec lui une nouvelle extraordinaire : les rayons déchargeant inopinément les électroscopes ne viennent pas du sol, comme on le croyait, mais du ciel ! Plus on s'approche du cosmos, plus il y en a...

Viktor Hess, comme tous les physiciens pendant encore une bonne quinzaine d'années, ignore tout de la nature de ce rayonnement. En 1925, Robert Millikan, croyant qu'il s'agit de photons énergétiques, les nomme « rayons cosmiques ». Mais à la fin des années 1920, l'influence du champ magnétique terrestre sur ces mystérieuses particules est mise en évidence. Plus aucun doute alors : les rayons cosmiques sont électriquement chargés ; Millikan avait tort ! Mais le nom est resté puisque ces particules viennent bien du cosmos. On sait à présent qu'ils se composent à près de 89% de noyaux d'hydrogène (c'est-à-dire de simples protons), à 9% de noyaux d'hélium (des particules alpha), 1% de noyaux plus lourds (comme l'oxygène, le carbone, l'azote ou le fer) et 1% d'électrons. Ces particules, très énergétiques ont manifestement été accélérées quelque part dans l'Univers. Mais où ? Et comment ?

La naissance d'une science nouvelle

Pendant plus de vingt ans, à défaut de connaître leur origine, les physiciens ont utilisé les rayons cosmiques comme des instruments incomparables pour étudier le comportement de la matière à haute énergie. Mais les accélérateurs de particules de l'époque n'étaient pas très performants. Alors, puisque la nature produit pour nous ces rayonnements énergétiques inattendus, autant en profiter ! C'est ainsi qu'une science nouvelle est née, tirant parti de rayons cosmiques inconnus : la physique des particules ! En étudiant les interactions entre les particules énergétiques et la matière, les physiciens mirent en évidence l'existence de nouvelles particules insoupçonnées, aux propriétés parfois étonnantes. Le plus grand coup d'éclat fut sans doute la découverte du positon par Anderson, en 1932, qui ressemblait en tout point à un électron mais qui tournait dans la direction opposée lorsqu'il était soumis à un champ magnétique, indiquant à l'évidence qu'il était de charge électrique opposée. Or un électron de charge positive, c'est exactement ce qu'avait prédit Paul Dirac quelques années plus tôt. La découverte d'Anderson marquait, non seulement la découverte d'une particule jusque là inconnue, mais aussi celle de ce qui n'était alors qu'une vue de l'esprit des théoriciens les plus audacieux : l'antimatière !

De nombreuses découvertes suivirent, toutes induites par l'étude des interactions des rayons cosmiques. Citons notamment le « muon », en 1936, identique à l'électron, mais 200 fois plus lourd, puis les trois types de « pions », en 1947, ou encore, de 1949 à 1953, les kaons, lambda, xi, sigma... particules qualifiées d'« étranges » en raison de leur durée de vie beaucoup plus longue qu'on ne pouvait s'y attendre compte tenu de leur masse. On finit par comprendre, longtemps après, qu'elles étaient constituées d'un quark différent de ceux composant les autres particules connues. Elles reçurent alors le nom de « quark étrange ».

Mais cette belle aventure de la physique des rayons cosmiques et de la physique des particules œuvrant main dans la main à l'avancée des connaissances perdit finalement de sa vigueur lorsque les progrès techniques permirent aux physiciens de disposer d'accélérateurs de particules terrestres suffisamment performants. Après la mise en service du CERN, à Genève, les physiciens des particules qui ne s'intéressaient en fait aux rayons cosmiques que comme intermédiaires pour générer des collisions à très haute énergie préférèrent l'environnement d'un laboratoire bien maîtrisé, délivrant à volonté les particules voulues, à l'énergie choisie par l'expérimentateur et ajustable dans les limites de capacité des instruments. Quelques pionniers, cependant, s'intéressaient aux rayons cosmiques pour eux-mêmes et poursuivaient le rêve d'en préciser davantage les caractéristiques et la nature, et bien sûr d'en déterminer l'origine ! Ces « cosmiciens » continuent donc leurs études, dans des conditions souvent difficiles, mais avec un enthousiasme et une persévérance qui finira bien par porter ses fruits.

À la poursuite de l'extrême

Puisque les rayons cosmiques viennent du cosmos, il est préférable d'aller les étudier en altitude. La haute montagne a donc toujours été le cadre privilégié de ces recherches, mais même à 5300 mètres d'altitude (où se trouve le plus haut

laboratoire de physique du monde, sur le mont Chacaltaya, en Bolivie) les rayons cosmiques qui nous parviennent ne sont pas « purs » : ils ont été affectés par leurs interactions avec la haute atmosphère, de sorte que ce sont principalement des particules secondaires, et non les rayons cosmiques eux-mêmes, que l'on détecte. Pour remonter à leurs caractéristiques primaires (à l'entrée de l'atmosphère), il faut renouveler l'aventure inaugurale de Hess et la pousser beaucoup plus loin : en utilisant des ballons stratosphériques... ou des satellites ! C'est ainsi qu'ont vu le jour toutes sortes de missions spatiales destinées à en apprendre davantage sur ces particules énigmatiques sillonnant à très haute énergie non seulement dans notre système solaire, mais aussi dans toute la Galaxie et même tout l'Univers.

Mais avant même l'avènement de l'ère spatiale, Pierre Auger, un cosmicien français, fit une découverte majeure qui allait ouvrir la voie à des recherches dont les plus audacieux développements sont encore à venir. En 1938, dans son laboratoire des Alpes, il mit en évidence l'existence ce qu'on appelle aujourd'hui des « gerbes atmosphériques géantes », qui se manifestaient expérimentalement par l'arrivée au sol de bouffées de particules énergétiques pouvant être observées simultanément par des détecteurs espacés de plusieurs mètres, voire d'une vingtaine de mètres les uns des autres. Pierre Auger comprit que ces véritables pluies de particules étaient en fait induites par l'arrivée dans l'atmosphère d'un rayon cosmique unique, particulièrement énergétique, qui, par des réactions en chaînes dans l'atmosphère, donnait lieu à la production de particules secondaires traversant le ciel de manière cohérente à la vitesse de la lumière et venant s'abattre sur le sol dans une vaste région couvrant des centaines de mètres carrés. Pierre Auger estima l'énergie initiale des rayons cosmiques qui produisaient ces gerbes atmosphériques géantes à plus d'un million de milliards d'électron-volts, c'est-à-dire mille fois plus que ce dont sont capables les plus grands accélérateurs de particules au monde en ce début de 21^{ème} siècle !

Ce n'était pourtant qu'un début. De surprise en surprise, poussés par l'émerveillement et la perplexité, les cosmiciens du monde entier se lancèrent à la poursuite des rayons cosmiques les plus énergétiques, tâchant de découvrir jusqu'où l'Univers pouvait accélérer des particules. Aujourd'hui, s'il existe une limite, nous ignorons toujours où elle se trouve ! Ce n'est pas qu'il soit difficile de détecter les gerbes atmosphériques géantes induites par les rayons cosmiques de très haute énergie : c'est même beaucoup plus facile qu'à basse énergie, puisque les effets induits dans l'atmosphère et le nombre de particules parvenant jusqu'au sol sont bien plus importants. Mais les cosmiciens des très hautes énergies font face à un problème incontournable : plus les rayons cosmiques sont énergétiques, plus ils sont rares ! Aux énergies les plus basses, on compte environ quatre rayons cosmiques entrant chaque seconde par chaque centimètre carré de la haute atmosphère terrestre. À l'énergie des rayons cosmiques découverts par Pierre Auger, on ne compte déjà plus qu'une particule par mètre carré et par an ! Mais tout cela n'est rien en comparaison des rayons cosmiques les plus énergétiques connus à ce jour. Leur énergie est proprement ahurissante. Avec quelques centaines de milliards de milliards d'électron-volts, on a affaire en réalité à des énergies macroscopiques : plusieurs dizaines de joules, soit l'énergie d'une balle de tennis à plus de 150 km/h ! On peine à croire que des particules microscopiques – probablement de simples protons – puissent acquérir de telles énergies. Et pourtant... Compte tenu des lois de la Relativité d'Einstein, nous savons que l'espace et le temps dans lesquels elles

évoluent sont très distordus par rapport aux nôtres. Une de leur seconde dure 3 500 ans pour nous, et la distance Terre-Soleil est ramenée pour elles à 1,50 mètres ! On comprend pourquoi ces particules fascinent les astrophysiciens. Comment et où ont-elles acquis une énergie aussi invraisemblable ? Quel mécanisme est à l'œuvre, dans quelle source de l'univers ? Ces questions fascinent et stimulent les plus vives recherches, mais la nature sait garder secrètes ses merveilles. Pour comprendre ces rayons cosmiques dits « ultra-énergétiques », il faut déjà pouvoir les détecter. Or à ces énergies, il en parvient sur Terre à peine une par kilomètre carré et par siècle !

Deux solutions se présentent alors : soit on attend des siècles avant d'en recueillir une poignée, soit on construit des détecteurs capables de détecter les gerbes atmosphériques géantes induites par ces rayons cosmiques ultra-énergétiques sur des milliers de kilomètres carrés. C'est bien sûr la seconde solution qui a été retenue. Sur le haut plateau des pampas argentines, dans la province de Mendoza, se dresse au pied des Andes le plus vaste ensemble de détecteurs au monde, qui couvrira bientôt 3000 km² de surface au sol. Bien sûr, il est inutile (et de toute façon impossible !) de recouvrir complètement une telle superficie de détecteurs. Mais puisque justement les gerbes atmosphériques induites par ces rayons cosmiques sont géantes, couvrant à elles seules jusqu'à plusieurs dizaines de km², il suffit de répartir un certain nombre de détecteurs en un maillage plus ou moins serré sur le sol pour être sûr que la gerbe en touchera suffisamment pour analyser ses caractéristiques et en déduire les propriétés (à savoir l'énergie, la direction d'arrivée, et peut-être la nature) du rayon cosmique incident...

Une autre technique de détection de ces gerbes consiste à observer la lumière de fluorescence émise par l'atmosphère juste après le passage de la gerbe. Il faut dire que celle-ci se compose d'un très grand nombre de particules (produites en cascade à la suite de l'interaction initiale dans la haute atmosphère). Aux énergies les plus élevées, un seul rayon cosmique peut produire des centaines de milliards de particules secondaires, dont chacune va pouvoir exciter et ioniser les molécules de l'air. En se désexcitant, ces molécules émettent de la lumière : c'est le phénomène de fluorescence, bien connu des observateurs d'aurores boréales ! Le détecteur déployé en Argentine, qui porte le nom d'Observatoire Pierre Auger, en l'honneur du découvreur de ces gerbes, combine les deux techniques de détection, à savoir l'observation au sol des particules constituant la gerbe et l'observation de la lumière de fluorescence qu'elles induisent tout au long de leur trajet dans l'atmosphère. Grâce à cela, les 250 physiciens des 16 pays engagés dans ce gigantesque projet espèrent recueillir suffisamment d'informations pour mieux comprendre le mécanisme de formation des gerbes elles-mêmes, et ensuite résoudre l'énigme persistante de ces particules ultra-énergétiques, dont l'origine est encore inconnue.

Accélération des particules dans l'Univers

Des progrès considérables dans la science des rayons cosmiques ont été enregistrés au cours des dernières décennies. On connaît dans le détail la composition des rayons cosmiques les moins énergétiques. On connaît assez leur répartition en fonction de l'énergie. On sait qu'à basse énergie, ils viennent de notre Galaxie, où ils sont confinés par les champs magnétiques pendant environ vingt

millions d'années, puis de moins en moins longtemps à mesure que leur énergie augmente. À très haute énergie, les champs magnétiques ne parviennent plus à incurver suffisamment leur trajectoire et à les contenir dans notre Galaxie. La plupart, si ce n'est la totalité des rayons cosmiques les plus énergétiques que nous détectons ont donc une origine extragalactique. Nous savons également comment les rayons cosmiques se propagent depuis leurs sources jusqu'à la Terre où nous les observons, c'est-à-dire à quels types d'interactions ils donnent lieu en rencontrant la matière interstellaire et les photons de différentes longueurs d'onde qui baignent notre Galaxie et tout l'Univers. Mais en dépit de ces avancées notables, nous ignorons toujours, près d'un siècle après sa découverte, quelle est la source exacte du rayonnement cosmique.

Les astrophysiciens commencent néanmoins à avoir des idées assez précises sur la manière dont les particules peuvent être accélérées dans l'Univers. Un des mécanismes les plus efficaces et les plus étudiés est « l'accélération diffuse par onde choc ». Elle a lieu au voisinage des ondes de choc que produisent notamment les explosions de supernovae dans le milieu interstellaire. Lors de ces événements marquant la fin de la vie des étoiles les plus massives (ou d'étoiles moins massives mais alimentées après leur extinction par un compagnon stellaire), la matière éjectée à des vitesses supersoniques perturbe le milieu ambiant par l'intermédiaire des champs magnétiques et produit des discontinuités de température, de densité et de vitesse entre le milieu « en amont » du choc et le milieu « en aval ». Piégées dans le champ magnétique accompagnant cette structure en mouvement (et qu'elles contribuent elles-mêmes à créer), certaines particules parviennent à traverser la discontinuité d'amont en aval, puis d'aval en amont, des milliers de fois, voire des millions de fois. À chaque cycle, elles gagnent un peu d'énergie, et finissent par atteindre des énergies considérables. Mais plus l'énergie des particules augmente, plus il leur faut de temps pour gagner un nouveau supplément d'énergie, et plus il est difficile de les confiner au voisinage de l'onde de choc. Ce processus possède donc une limite naturelle qui dépend des caractéristiques précises de l'environnement astrophysique considéré.

Il existe en réalité de très nombreuses sources dans lesquelles la présence de particules énergétiques est attestée. C'est d'ailleurs le plus souvent grâce à ces particules et au rayonnement qu'elles induisent qu'on peut voir briller ces sources dans des domaines de longueurs d'onde très divers, allant des ondes radios aux rayons X et gamma les plus énergétiques. Mais outre la description précise des mécanismes d'accélération, le défi majeur de l'astrophysique des rayons cosmiques reste de préciser le lien entre les sources de particules énergétiques (dont on peut détecter la présence dans telle ou telle source) et les particules effectivement observées au voisinage terrestre. À vrai dire, il ne suffit pas d'accélérer des particules pour être une source de rayons cosmiques. La plupart des sources connues ne peuvent apporter au mieux qu'une contribution négligeable au rayonnement cosmique découvert par Viktor Hess. C'est une des raisons pour lesquelles la source véritable de ces rayons cosmiques échappe encore aux astrophysiciens. Il est probable qu'un type de source particulier domine toutes les autres par sa puissance et produise l'essentiel des rayons cosmiques accélérés dans la galaxie. Mais à très haute énergie, des sources plus puissantes extragalactiques d'un type très différent pourraient entrer en jeu. Mais lesquelles ? Parmi les candidats les plus sérieux, on peut citer les noyaux actifs de galaxies, abritant en leur cœur des

trous noirs supermassifs et projetant dans l'espace intergalactique de gigantesques jets de matière relativiste, ou encore les sursauts gamma, ces explosions d'une puissance exceptionnelle dont on observe les bouffées de photons énergétiques jusqu'aux confins de l'Univers.

Vers « l'astronomie proton »

Le principal obstacle à la quête de l'origine des rayons cosmiques a toujours été le fait que ces particules sont électriquement chargées et subissent donc des déflexions multiples dans le champ magnétique chaotique de la galaxie, jusqu'à perdre totalement la "mémoire" de leur direction de propagation initiale. De fait, la distribution angulaire du rayonnement cosmique apparaît totalement isotrope (à la précision des mesures près), c'est-à-dire qu'aucune région du ciel n'est plus "brillante" qu'une autre : le flux de rayons cosmiques est uniforme à travers le ciel. S'il en était de même pour les photons, on n'observerait pas une étoile ici, une galaxie là, un pulsar un peu plus loin, mais en toutes les directions la même superposition uniforme de tous les photons émis par toutes les sources du ciel ! Impossible de faire de l'astronomie dans ces conditions ! C'est pourtant très précisément la situation rencontrée par les « cosmiciens » qui doivent rechercher la source des rayons cosmiques dans le plus épais des brouillards magnétiques.

Mais des efforts expérimentaux sans précédent sont actuellement consentis par une vaste communauté internationale de physiciens des particules et d'astrophysiciens pour percer le mystère des rayons cosmiques les plus énergétiques, et cela devrait également permettre pour la première fois de percer ce brouillard magnétique. De fait, plus l'énergie des particules chargées est élevée, moins les champs magnétiques parviennent à incurver leur trajectoire. Par ailleurs, un phénomène physique intéressant se manifeste aux énergies extrêmes, lié à la présence, partout dans l'Univers, d'un grand nombre de photons provenant des premiers âges de sa formation : le fameux rayonnement fossile (ou « fonds diffus cosmologique »). Ces photons forment aujourd'hui une sorte de bain thermique extrêmement froid (moins de 3 degrés Kelvin), et possèdent donc une énergie très faible, en principe totalement inoffensive. Mais pour les rayons cosmiques ultra-énergétiques qui se jettent en quelque sorte sur eux à des vitesses phénoménales (ne différant de la vitesse de la lumière que par moins d'un millième de milliardième de milliardième !), le rayonnement fossile paraît composé de photons bien plus énergétiques : des photons gamma capables de briser les noyaux ou de créer des particules tels que des paires électrons-positons ou même des pions. Ces derniers ont une masse correspondant à environ 15 % de celle du proton, de sorte que le mécanisme quantique qui conduit à leur production doit s'accompagner d'une perte d'énergie non négligeable pour les protons du rayonnement cosmique (car il faut bien conserver l'énergie globale !).

Le bilan de ce mécanisme – prédit par l'américain Greisen et indépendamment par les russes Zatsepin et Kuz'min dès 1966, c'est-à-dire immédiatement après la découverte du rayonnement fossile – est que les rayons cosmiques les plus énergétiques ne peuvent pas survivre longtemps dans l'Univers. Après quelques centaines, voire quelques dizaines de millions d'années-lumière seulement (ce qui

est très peu à l'échelle de l'Univers), ils voient leur énergie suffisamment dégradée pour que le mécanisme de création de particules ne soit plus possible, et que le processus de pertes d'énergie s'arrête.

Il y a deux conséquences à cela. La première est que si nous voyons des particules à une énergie supérieure à l'énergie donnant lieu au mécanisme évoqué ci-dessus (dit « mécanisme GZK », par référence aux trois physiciens mentionnés), nous pouvons être certains que leur source est relativement proche. Les champs magnétiques intergalactiques ont donc très peu de temps pour agir sur ces particules, et comme par ailleurs leur action sur elles est limitée du fait de leur très grande énergie, on devrait finalement parvenir à des déflexions négligeables. La malédiction du rayonnement cosmique serait alors vaincue : enfin, la direction d'arrivée des particules indiquerait directement la direction de leurs sources, qui deviendraient alors visuellement identifiables ! Cela marquerait l'ouverture d'une astronomie nouvelle, non plus avec les seuls photons (particules de lumières non chargées et donc insensibles aux champs magnétiques), mais avec les protons du rayonnement cosmique eux-mêmes : "l'astronomie proton" !

La seconde conséquence du mécanisme GZK est que dans la mesure où seules les sources les plus proches peuvent contribuer au flux de rayons cosmiques les plus énergétiques, on s'attend à en observer beaucoup moins qu'aux énergies plus basses, pour lesquelles les contributions de pratiquement toutes les sources de l'Univers s'additionnent. La réduction drastique du flux qui en découle est appelée "coupure GZK". Sa détection est un objectif observationnel important, qui devrait être atteint dans les toutes prochaines années. Ensuite, c'est toute l'aventure de l'astronomie proton qui pourra débiter, en liaison avec les autres astronomies (l'astronomie photon, bien sûr, mais aussi l'astronomie neutrino, qui commence à être mise sur pied), pour une étude complète des sources les plus énergétiques, et parfois les plus énigmatiques de l'Univers.

Site Internet :

<http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/documents/numero3/numero3.pdf> : numéro de la revue « Élémentaire » consacrée aux rayons cosmiques, téléchargeable en PDF