

Une brève histoire des rayons cosmiques

Jacques Paul

DAPNIA/Service d'Astrophysique, CEA/Saclay, 91191
Gif-sur-Yvette Cedex, France
Fédération de Recherche APC, Université Paris 7, 2 place
Jussieu, 75251 Paris Cedex 05, France

Comme disait le bon La Fontaine : « aide-toi, le ciel t'aidera ». C'est d'ailleurs assez courant de voir le ciel donner de temps en temps un petit coup de pouce aux chercheurs terrestres. Les premiers sidérurgistes n'apprirent-ils pas à travailler le fer grâce à ces météorites en fer quasi pur que les dieux leur lançaient depuis leurs demeures sidérales ? Il en fut de même pour les physiciens dans la première moitié du vingtième siècle, quand ils se rendirent compte à quel point la Terre était bombardée par une pluie de particules accélérées : les rayons cosmiques.

Tout commença peu avant la première guerre mondiale. À cette époque, détecter les particules ionisantes passait encore par la mise en œuvre d'électroscopes, ces beaux appareils aptes à mesurer les charges électriques, si chers à nos livres de physique récréative. Certains physiciens étaient alors surpris du fait que leurs électroscopes se déchargeaient spontanément, même quand ils les rangeaient soigneusement dans une armoire bien close pour éviter l'action de la lumière. Impossible donc d'évoquer l'effet photoélectrique, découvert par Hertz plus de vingt ans auparavant. Certains postulaient plutôt qu'il devait émaner du sol une sorte de rayonnement ionisant, peut-être de même nature que celui découvert par Becquerel lors de ses fameuses expériences avec les sels d'uranium. On sait maintenant qu'un tel rayonnement existe bel et bien, il s'agit des rayons gamma émis par les éléments radioactifs naturels répandus dans la croûte terrestre, avec, au premier rang, un isotope du potassium : le potassium 40.

En 1909, un jésuite allemand, le Père Wulf, qui avait développé un électroscope ultra stable, l'installa en haut de la Tour Eiffel. Il constata alors que la diminution du taux de décharge de son électroscope était moindre que prévu si tout l'effet ionisant était dû à un rayonnement uniquement d'origine tellurique. Hess, un physicien autrichien, au courant de l'expérience du Père Wulf, se persuada alors que seule une expérience menée lors d'une ascension en ballon permettrait d'en savoir plus sur

l'origine de ces rayonnements. De 1911 à 1913, Hess effectua pas moins de dix ascensions à bord d'une nacelle portée par ballon. Son appareillage scientifique : des électroscopes du type de celui développé par Wulf, mais modifiés pour résister à la baisse de pression atmosphérique et à la chute de température que l'on rencontre à haute altitude, une véritable « spatialisation » avant la lettre !

Le résultat de ce qui fut sans doute la première expérience de physique spatiale fut sans appel. Alors qu'à une altitude de cinq cents mètres, les électroscopes se déchargeaient deux fois moins rapidement qu'au sol, le taux d'ionisation se remettait ensuite à croître d'une manière indiscutable. Déjà à quinze cents mètres, Hess enregistrait un taux d'ionisation comparable à celui mesuré au sol ; à cinq mille mètres enfin, l'altitude maximum qu'il parvint à atteindre, le taux d'ionisation était très largement supérieur à la référence sol. Laissons à Hess le soin de conclure : « la seule manière d'interpréter mes résultats expérimentaux fut d'admettre l'existence d'un rayonnement très pénétrant, d'une nature encore inconnue, venant principalement d'en haut, et étant très probablement d'origine extraterrestre ».

Bien avant les expériences de Hess, nos lointains ancêtres étaient déjà les témoins du fait que l'atmosphère terrestre est de temps en temps plongée dans un flux intense de particules accélérées. Les aurores boréales, que décrivent abondamment les chroniques du passé, même les plus anciennes, sont les spectaculaires manifestations que des bouffées de particules accélérées lors des éruptions solaires induisent dans la haute atmosphère terrestre. La fréquence d'apparition des aurores boréales déduite du recoupement des informations relatées par les chroniques, a même permis de reconstruire le cycle d'activité du Soleil tout au long des ères historiques. Belle démonstration qu'une information scientifique fort pertinente peut se cacher dans les vieux grimoires.

Devenus très à la mode après le premier conflit mondial, les rayons cosmiques retinrent alors l'attention des meilleurs physiciens de la planète. Il leur faudra quand même une bonne vingtaine d'années pour en cerner la véritable nature. Un débat homérique opposa en la matière les physiciens américains Millikan et Compton. Le premier était persuadé qu'à son entrée dans l'atmosphère, le rayonnement cosmique était composé de photons. Il en est d'ailleurs resté ce terme plutôt impropre de « rayon cosmique », introduit dès 1925 par Millikan. Le second défendait par contre une nature corpusculaire, les rayons cosmiques étant pour Compton des particules chargées électriquement. Fin décembre 1932, quand Millikan attaqua Compton à la réunion de Noël de l'Association Américaine pour l'Avancement des Sciences, le débat atteint une telle virulence que le *New York Times* en fit sa « une » le 31 décembre 1932.

L'hypothèse d'une nature corpusculaire était pourtant déjà bien affirmée depuis 1927, quand Clay, au cours d'un voyage en bateau d'Amsterdam à Java, parvint à mettre en évidence la dépendance du flux des rayons cosmiques avec la latitude géomagnétique, l'intensité étant minimum au voisinage de l'équateur. Il fut ainsi établi qu'avant de pénétrer dans l'environnement terrestre, le gros des rayons cosmiques était des particules chargées. En 1933, tirant parti de l'effet est-ouest, Lemaitre et Vallarta d'une part et Rossi d'autre part, déterminèrent indépendamment que la majorité des rayons cosmiques étaient des particules chargées positivement. En 1938 enfin, le physicien français Auger, qui avait disposé des détecteurs de particules dans les Alpes, nota que deux détecteurs situés à plusieurs mètres l'un de l'autre, signalaient l'arrivée de particules exactement au même instant. Il venait de découvrir les « grandes gerbes atmosphériques », causées par l'interaction des rayons cosmiques les plus énergétiques avec les particules de la haute atmosphère.

Ces interactions produisent une cascade de particules secondaires, qui se multiplient par chocs successifs à mesure que s'accroît la densité des couches atmosphériques. Ces particules secondaires forment alors une gerbe de particules très bien fournie à haute altitude, mais qui s'amenuise progressivement à l'approche du sol. Les gerbes induites par les particules les plus énergétiques parviennent néanmoins à arroser une vaste zone de la surface terrestre. C'est ainsi qu'au vu de ses mesures, Auger conclut qu'il avait observé les sous produits d'une interaction induite par des particules dont les énergies étaient de l'ordre d'un million de gigaélectronvolts, soit des particules dix millions de fois plus énergétiques que toutes celles observées précédemment.

Pendant les années trente, les rayons cosmiques passèrent peu à peu du rang de curiosité scientifique à celui d'outil indispensable au développement de la physique des particules. Dans leur fructueux va-et-vient entre théorie et expérimentation, les physiciens en étaient arrivés au point où il leur fallait briser les noyaux atomiques avec des projectiles autrement plus énergétiques que les quelques particules émises spontanément par les substances radioactives. Il y avait bien une solution : construire des machines propres à accélérer les particules, comme le cyclotron conçu en 1929 et réalisé trois ans plus tard par l'Américain Lawrence. Mais jusqu'au début des années cinquante, ces accélérateurs ne furent pas en mesure de fournir aux particules les énergies propres à satisfaire les exigences des physiciens.

En ce temps-là, les premiers accélérateurs parvenaient tout juste à communiquer aux particules des énergies de quelques mégaélectronvolts. De nombreux physiciens se tournèrent alors vers les rayons cosmiques. Pas de problème d'énergie : celle des particules cosmiques dépasse allègrement les mille gigaélectronvolts, un seuil tout juste à la portée des

plus grandes installations actuellement en service. En fait, les rayons cosmiques les plus énergétiques emmagasinent ainsi plus de mille milliards de gigaélectronvolts, soit l'énergie qu'acquiert une boule de métal de un kilo tombant d'une hauteur de vingt mètres ! Les rayons cosmiques sont toutefois d'un emploi beaucoup plus délicat que les particules accélérées au sol puisque les expériences les concernant doivent être mises en œuvre à très haute altitude. Mais à la fin des années trente, il n'y avait pas d'autre choix possible.

Les rayons cosmiques furent pendant deux décennies les grands pourvoyeurs de résultats en physique des particules couronnés de prix Nobel. En 1932, Anderson découvrait le positon ; en 1938, le même Anderson détectait le muon, tandis qu'en 1947 Cecil Powell et ses collaborateurs isolaient les pions chargés. Puis vint l'époque où les physiciens délaissèrent les rayons cosmiques pour les particules certes moins énergétiques, mais bien plus maniables, fournies par les accélérateurs géants qui entraient peu à peu en service en Europe, aux États-Unis et en Union Soviétique. C'est curieusement à la même époque qu'astronomes et astrophysiciens commencèrent enfin à se préoccuper des sites célestes où ces particules cosmiques pouvaient acquérir leur fabuleuse énergie.

Ne voyez là chez les astronomes aucune mauvaise volonté, ni je ne sais quelle jalousie envers ces physiciens des particules venus piétiner leurs plates-bandes célestes. Ce genre d'attitude mesquine est tout à fait impensable dans les milieux scientifiques et il faut donc chercher ailleurs ce manque d'entrain à vouloir remonter aux sources du rayonnement cosmique. La vérité est toute bête : ce sont des particules dotées d'une charge électrique, donc incapables de se propager en ligne droite dans les espaces interstellaires. Il n'est donc pas possible de savoir ni d'où elles viennent ni où elles vont. Mais la nature, pour une fois, ne s'est pas montrée trop cruelle. Véritables petits poucets des espaces interstellaires, les rayons cosmiques sèment en effet derrière eux une traînée de signes tout à fait déchiffrables.

Prenons par exemple le cas des électrons. Ils ne représentent certes qu'une bien faible fraction du rayonnement cosmique : à peine un pour cent. Mais chaque fois que les champs magnétiques ancrés au sein du milieu interstellaire incurvent leurs trajectoires, ils émettent une pincée de rayonnement de nature synchrotron. On désigne ainsi le rayonnement produit par un électron animé d'un mouvement giratoire car elle fut observée pour la première fois en 1947 dans des accélérateurs de particules de type synchrotron. Les champs magnétiques intenses des électroaimants terrestres imposent aux particules des trajectoires extrêmement courbées. Les électrons y émettent alors un rayonnement synchrotron qui tombe jusque dans le domaine des rayons X. Dans le milieu interstellaire, où les champs magnétiques sont des milliards de fois moins intenses, les

électrons relativistes rayonnent plutôt dans le domaine radio. Au début des années cinquante, quand fleurirent les premiers radiotélescopes, les astronomes captèrent sans grande difficulté ce rayonnement synchrotron que produisent les électrons du rayonnement cosmique.

La voûte céleste fut entièrement mise en carte dans les bandes décimétriques du domaine radio. Comme on peut s'y attendre, le rayonnement synchrotron trace dans le ciel une structure diffuse qui suit grosso modo les contours de la Voie lactée. Pas de doute, les électrons cosmiques emplissent bien tout le disque de la Galaxie. Il semble même y en avoir plus dans les régions centrales qu'à la périphérie, comme si les sources y étaient plus abondantes. Suivre ainsi la piste des électrons cosmiques, c'est bien, mais il ne faut pas oublier qu'ils ne représentent qu'une très faible fraction du rayonnement cosmique. Il serait quand même plus judicieux de pister directement les protons et noyaux qui en constituent l'essentiel. Mais là, plus question de domaine radio. C'est au contraire dans le domaine gamma que les astronomes furent invités à repérer le sillage des protons et noyaux du rayonnement cosmique. Là encore, c'est le milieu interstellaire qui joue les révélateurs, non par son magnétisme, mais en tant qu'obstacle présent sur la trajectoire des rayons cosmiques.

Malgré son extrême dilution, le milieu interstellaire n'en contient pas moins assez de particules pour que les protons et noyaux cosmiques qui s'y propagent risquent à la longue de percuter un atome du milieu. Toute une kyrielle de particules surgit alors d'une telle collision. Certaines d'entre elles, comme les pions neutres, se désintègrent promptement en deux photons gamma de haute énergie, soixante-dix mégaélectronvolts en moyenne. Il suffit donc de repérer les sites d'émission de ces photons gamma pour savoir où se propagent les protons et noyaux du rayonnement cosmique. Avec un peu de chance, ne pourrait-on pas remonter ainsi le courant du rayonnement cosmique jusqu'à ses sources ?

On en était là au milieu des années soixante. L'Europe de l'espace qui commençait à prendre forme offrait l'opportunité aux laboratoires européens de se lancer eux aussi dans l'aventure spatiale. Les charges utiles des premiers satellites étaient fort réduites : pas question, dans ces conditions, d'embarquer des télescopes aussi volumineux que ceux qui opèrent de nos jours dans l'espace ! Les Européens étaient malgré tout fermement déterminés à entamer les premières explorations du ciel gamma, en privilégiant la bande spectrale où se manifestent les interactions des rayons cosmiques avec la matière interstellaire. Une flopée de petites expériences virent ainsi le jour, toutes malheureusement trop petites pour obtenir des résultats décisifs.

En 1969, changement capital. L'Organisation Européenne de Recherches Spatiales, devenue Agence Spatiale Européenne cinq ans plus tard, approuvait la réalisation d'un satellite entièrement dédié à l'astro-

nomie des rayons gamma de haute énergie. Son objectif principal : traquer les protons du rayonnement cosmique, d'où son nom, COS-B. Consacré sans réserve aux rayons cosmiques, COS-B profitait du crédit du physicien italien Ochialini, un des pères fondateurs de l'Europe spatiale, grand nom du mariage entre physique des particules et rayonnement cosmique. Il travailla en effet avec Blackett avant de rejoindre Powell, avec lequel il découvrit les pions chargés. Si le Nobel échappa à Ochialini, ce fut sans doute en raison de sympathies politiques trop ouvertement proclamées au plus fort de la guerre froide et du maccarthysme triomphant !

La course à l'espace, enfantée par la rivalité entre les États-Unis et l'ancienne Union Soviétique, fut donc décisive pour prolonger l'étude du rayonnement cosmique. Les moyens spatiaux offrirent ainsi l'opportunité de mesurer directement le rayonnement cosmique. De 1964 à 1966, les satellites soviétiques PROTON mesurèrent l'intensité et le spectre du rayonnement cosmique jusqu'à cent mille gigaélectronvolts, puis de 1979 à 1981, le satellite américain HEAO-3 (avec contribution française à la charge utile) mesura la composition chimique et isotopique des noyaux du rayonnement cosmique. Les moyens spatiaux furent aussi décisifs pour remonter aux sources du rayonnement cosmique par le truchement de l'astronomie des rayons gamma à haute énergie. Après le satellite américain SAS-2, de 1972 à 1973, et l'europpéen COS-B, de 1975 à 1982, ce fut au tour de l'américain CGRO d'étudier de 1991 à 2000 les conditions d'accélération et de propagation du rayonnement cosmique.

Pour conclure ce bref historique, il convient enfin d'évoquer les travaux théoriques liés au rayonnement cosmique. Dès 1934, Baade et Zwicky, avaient suggéré que l'énorme libération d'énergie observée dans les supernovae était causée par l'effondrement d'une étoile massive, et que ces débits d'énergie pouvaient être à la source des rayons cosmiques. Puis, en 1949, Fermi proposa un mécanisme susceptible d'accélérer les rayons cosmiques jusqu'à de très hautes énergies. Ce processus est basé sur l'hypothèse que des particules chargées gagnent en énergie par rebondissements successifs sur des miroirs magnétiques en mouvement dans l'espace. Un tel processus serait à l'œuvre au sein des restes de supernova, sans pour autant être en mesure d'expliquer l'accélération des rayons cosmiques d'ultra haute énergie.