

# Histoire du rayonnement cosmique

Matthieu Renaud,

astrophysicien au CNRS/IN2P3, LUPM, Montpellier, matthieu.renaud@umontpellier.fr

*Les rayons cosmiques ont été officiellement découverts en 1912. Leur histoire débute cependant dès le XVIII<sup>e</sup> siècle, et se poursuit activement aujourd'hui avec des communautés internationales composées d'astronomes, d'astrophysiciens et de physiciens des particules traquant les sources à l'origine du rayonnement cosmique. Dans la lignée de leurs illustres prédécesseurs, cosmiciens et aventuriers, ils exploitent de nos jours un large panel d'instruments de toute sorte, installés sous et sur terre, depuis les glaces polaires et les fonds marins jusqu'aux montagnes, déserts et autres plateaux d'altitude, ou embarqués à bord de ballons et de satellites dans l'espace. Il est ici conté, dans ses grandes lignes, la riche histoire de ces particules cosmiques mêlant infiniment grand et infiniment petit, recherches fondamentales et développements technologiques intimement liés aux grandes avancées scientifiques du XX<sup>e</sup> siècle.*

## De l'électricité aux rayonnements ionisants

Plus d'un siècle après l'introduction du terme « électricité<sup>1</sup> » par le savant anglais William Gilbert, Charles François de Cisternay du Fay, chimiste français, émit l'hypothèse en 1733 de l'existence de deux sortes d'électricité, l'une *vitreuse* et l'autre *résineuse*, suite à une série d'expériences portant sur l'attraction et la répulsion de différents corps électrisés. Quelques décennies plus tard, en plein siècle des Lumières, Jean Antoine Nollet, homme d'Église et de science, conçut les premiers électroscopes, à boules de sureau puis à feuilles d'or (figure 1a), permettant de « peser les fluides électriques ».



**Fig. 1a.** À gauche, schéma des premiers électroscopes à feuilles d'or, suspendues à une tige conductrice qui, une fois chargée par induction ou par contact, amène les feuilles à se repousser mutuellement.

**Fig. 1b.** À droite, électromètre de type Wulf dans lequel les feuilles d'or sont remplacées par de fines lamelles de verre silicaté, dont l'écartement est mesuré précisément par un microscope.

1 Mot issu du grec ἤλεκτρον, *elektron*, désignant l'ambre jaune, connue des Grecs anciens tels Thalès de Milet, pour attirer les objets légers, une fois la surface frottée.

À cette époque, il avait été constaté que l'écartement des feuilles d'or, après la mise en contact de l'électroscope avec un corps électrisé, diminuait avec le temps, et ce en l'absence de toute action extérieure.

À la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, Charles-Augustin de Coulomb fut le premier à étudier la décharge au cours du temps d'une sphère initialement électrisée et conclut en 1785 que « la quantité d'électricité qu'un corps isolé perd dans un temps donné » peut s'expliquer « soit par le contact de l'air plus ou moins humide, soit le long des soutiens plus ou moins idio-électriques<sup>2</sup> ». Au cours du siècle suivant, Michael Faraday (1835) confirma les observations de Coulomb avec un appareillage de meilleure facture, et William Crookes montra, en 1879, que le taux de décharge variait avec la pression de l'air. Les scientifiques soupçonnèrent alors l'existence d'un phénomène<sup>3</sup> dans l'air contenu dans les instruments qui apporte des charges propres à neutraliser les feuilles d'or, mais l'origine de ce processus restait une énigme.

Au cours d'une série d'expériences menées en 1887 et 1888, les physiciens allemands Heinrich Hertz et Wilhelm Hallwachs démontrèrent que la lumière ultraviolette est à même d'arracher des charges électriques à la matière. La dernière décennie du XIX<sup>e</sup> siècle vit alors se succéder les découvertes de rayonnements tous plus ionisants les uns que les autres. En 1895, Jean Perrin, par le biais d'études menées avec des tubes à décharge dits de Crookes,

2 Susceptible d'acquérir les propriétés électriques par le frottement.

3 Que l'on nomme aujourd'hui l'ionisation, c'est-à-dire le processus par lequel un électron est extrait d'un atome, laissant ce dernier à l'état d'ion, donc porteur d'une charge électrique.

révéla la nature corpusculaire des rayons cathodiques (des électrons, mis en évidence deux ans plus tard par Joseph John Thomson). La même année, Wilhelm Röntgen, en étudiant ces mêmes rayons cathodiques, découvrit un rayonnement hautement plus pénétrant et inconnu jusqu'alors, qu'il nomma à juste « titre » rayons X (figure 2a).

En 1896, Henri Becquerel, spécialiste des phénomènes de phosphorescence, mena une série d'expériences sur les sels d'uranium, et put attester de l'existence d'un rayonnement propre qu'il nomma rayons uraniques (figure 2b) et dont les propriétés ionisantes furent par la suite étudiées par Marie Curie. Avec son mari Pierre Curie, ils découvrirent de nouvelles substances, le polonium et le radium, également capables d'émettre de tels rayonnements (et dénommés  $\alpha$  et  $\beta$  par Ernest Rutherford et  $\gamma$  par Paul Villard pour distinguer leur différence de nature) et baptisèrent ce phénomène naturel, la radioactivité.



**Fig.2.** En haut : première radiographie (Röntgenogram) de la main d'Anna Röntgen, intercalée entre un tube à décharge et une plaque photographique, prise le 22 décembre 1895.  
 En bas : cliché développé par Henri Becquerel le 1<sup>er</sup> mars 1896 après être resté dans l'obscurité d'un tiroir. On distingue dans la tache inférieure, une croix de Malte à laquelle Becquerel fait allusion (« Si, entre la lamelle du sel d'uranium et la lame d'aluminium ou le papier noir, on interpose un écran formé d'une lame de cuivre [...] par exemple en forme de croix, on observe dans l'image la silhouette de cette croix, en plus clair »). Les annotations sont de la main de Becquerel (cliché de la Bibliothèque de l'École polytechnique).

### Origine terrestre ou cosmique ?

Il restait cependant à expliquer le phénomène de décharge des électroscopes, même en prenant soin de les protéger contre tous ces rayonnements ionisants (aujourd'hui connus comme étant de type électromagnétique, UV, X,  $\gamma$ , ou corpusculaire,  $\alpha$ ,  $\beta$ ). Isolés consciencieusement au sein de blindages métalliques de différentes natures et épaisseurs, par les physiciens allemands Julius Elster et Hans Geitel et plus tard par le scientifique néo-zélandais Ernest Rutherford, ou même installés au sein d'un ancien

tunnel ferroviaire par le physicien écossais Charles Wilson, les électroscopes continuaient à se décharger. Les résultats obtenus par Wilson l'amènèrent en 1901 à émettre l'hypothèse que « la cause de la production d'ions dans l'air pur pourrait résider dans un rayonnement émis par des sources situées hors de l'atmosphère [...] et doué d'un pouvoir de pénétration considérable », tout en concluant qu'une telle idée était peu vraisemblable. Et pour cause, l'opinion générale penchait plutôt pour une origine tellurique, les électroscopes devant baigner dans un rayonnement issu de la radioactivité des roches terrestres, mise en évidence quelques années auparavant par les Becquerel et Curie. Plusieurs scientifiques du début du xx<sup>e</sup> siècle menèrent alors des campagnes de mesures systématiques du taux de décharge des électroscopes dans différentes conditions de température, de pression et d'environnement. Franz Linke en 1902, Karl Bergwitz et Albert Gockel<sup>4</sup> en 1909, décidèrent d'emporter des électroscopes lors d'ascensions en ballon, jusqu'à près de 5500 m d'altitude. Ils observèrent qu'au-delà d'une certaine altitude, le taux de décharge était à la hausse, ce qui ne pouvait s'expliquer par une origine purement terrestre. Mais les résultats obtenus étaient entachés de soucis instrumentaux et ne permettaient pas de tirer des conclusions définitives.

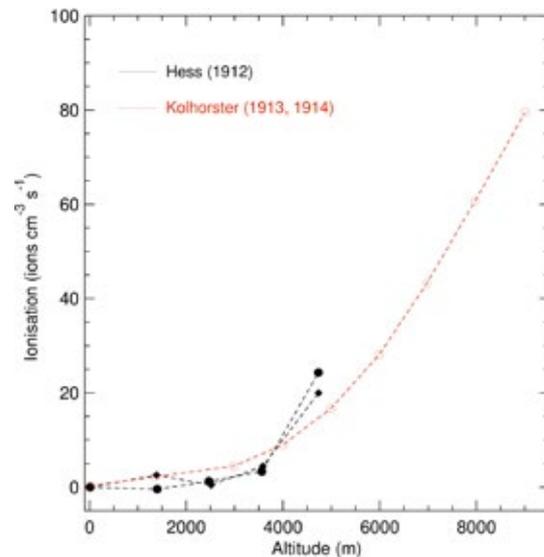
À cette époque, la précision des mesures était modeste et les électroscopes difficilement transportables. De nouvelles idées de mesure couplées à des avancées technologiques étaient alors nécessaires pour répondre à la question de l'origine de ce rayonnement ionisant cosmopolite. En 1909, le jésuite et scientifique allemand Théodore Wulf mit au point un nouveau type d'électroscope, d'une sensibilité inégalée (figure 1b). Il mena une première série de mesures dans des galeries souterraines et constata avec étonnement que le taux de décharge de son électromètre sous terre était inférieur à celui mesuré à la surface. Il décida alors d'emmener son appareil le plus haut possible, loin du sol. Grâce au soutien de Paul Langevin, il obtint les autorisations nécessaires pour installer ses instruments, en 1910, sur l'édifice le plus haut du monde à l'époque... au troisième étage de la tour Eiffel ! Et là encore, les résultats obtenus le laissèrent perplexe : à près de 300 m au-dessus du Champ-de-Mars, le taux de décharge avait effectivement diminué par rapport aux valeurs mesurées au pied de la tour, mais seulement de « pas même une moitié », alors qu'il s'attendait à un taux bien plus faible dans l'hypothèse d'une

<sup>4</sup> Il fut le premier, après une série de mesures obtenues avec Wulf dans les montagnes alpines en 1908, à proposer le terme de « kosmische Strahlung » ou « radiation cosmique ».

origine tellurique. Entre 1907 et 1911, un physicien italien, Domenico Pacini, mena des campagnes de mesure du taux d'ionisation à différentes altitudes, en montagne, sur des lacs et en mer, ce qui lui permit d'avancer, dès 1910, que le sol ne pouvait être l'unique cause de ce rayonnement ionisant. En juin 1911, il eut l'idée d'immerger un électroscope de type Wulf, soigneusement installé dans une caisse en cuivre, à 3 m sous le niveau de la mer, dans le golf de Gênes au large de Livourne, et mesura à plusieurs reprises une réduction significative du taux de décharge (de 20 %) par rapport à celui mesuré à la surface. Dans un article publié en 1912, il en conclut alors « [...] qu'une source importante de l'ionisation existe dans l'atmosphère, provenant d'un rayonnement pénétrant, indépendamment de l'action directe de la radioactivité des sols ».

Bien que toutes ces campagnes de mesures semblaient pointer vers une cause principalement autre que terrestre, la plupart des physiciens étaient encore réticents à l'idée d'abandonner l'hypothèse d'une origine tellurique, plus « naturellement » compréhensible. En 1910, un jeune physicien autrichien, Victor Hess développait des méthodes d'étalonnage précis des électroscopes à l'aide de sources radioactives au sein du nouvel Institut du radium à Vienne. Convaincu par les résultats obtenus par Wulf, et grâce à une bourse de l'Académie impériale des sciences, il entreprit dix ascensions en ballon : trois en 1911 et sept en 1912. Dans le but de mettre en évidence une éventuelle contribution du Soleil, Hess effectua cinq de ses vols de nuit, tandis qu'un autre coïncida même avec une occultation solaire quasi totale le 12 avril 1912. Mais le vol le plus mémorable fut celui du 7 août 1912, à bord de l'aérostat Böhmen ; avec deux électromètres modèle Wulf modifiés par ses soins pour résister aux basses pressions et températures régnant à haute altitude, Hess nota l'évolution des taux de décharge mesurés au cours de l'ascension qui l'emmena à 5 350 m au-dessus du sol. En dessous de 1 000 m, les mesures obtenues étaient en accord avec les précédentes, et au-delà de 1 500 m d'altitude le taux était à nouveau en nette augmentation, jusqu'à atteindre une valeur nettement supérieure à la référence sol (figure 3) ! Et à Hess 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 très probablement d'origine extraterrestre », et qu'il nomma « Höhenstrahlung » (rayonnement venant d'en haut). L'article publié en 1912 attira l'attention du physicien allemand Werner Kolhörster.

Celui-ci parvint, au cours de plusieurs vols en ballon entre 1913 et 1914, à emporter des instruments de mesure jusqu'à 9 300 m d'altitude, où il y mesura un taux quasiment dix fois supérieur à la valeur au sol (figure 3). Tout en confirmant les mesures de Hess, il estima également que le coefficient d'absorption dans l'air de ce rayonnement était nettement inférieur à celui du rayonnement  $\gamma$ , pourtant hautement pénétrant.



**Fig.3.** Courbes expérimentales du taux d'ionisation (soustrait de la mesure de référence au sol) en fonction de l'altitude obtenues par Hess en 1912 (en noir) et par Kolhörster en 1913 et 1914 (en rouge).

### Particules ou rayons ?

À l'issue de la Grande Guerre, le début des années 1920 fut une époque de floraison exceptionnelle à la fois sociale, culturelle, artistique et scientifique. La question de la nature de ce rayonnement cosmique retint alors l'attention des meilleurs scientifiques de la planète, et notamment aux États-Unis. Au sein du tout nouveau laboratoire Caltech à Pasadena en Californie, le physicien américain Robert Andrews Millikan, quelque peu sceptique à l'égard des conclusions de Hess et consorts, entreprit dès 1922 de mener ses propres mesures, par le biais d'électromètres compacts, automatisés et embarqués à bord de ballons-sondes à très haute altitude. En 1924, il affirmait que « l'entièreté de ce rayonnement pénétrant est d'origine locale ». Mais dès l'année suivante, de nouvelles mesures de haute précision effectuées avec son collègue Harvey Cameron sous différentes épaisseurs d'eau dans deux lacs de montagne d'altitudes différentes, l'amènèrent finalement à considérer que « ces rayons très pénétrants sont d'origine cosmique entrant dans l'atmosphère de manière uniforme dans toutes les directions ». Il les nomma alors « rayons cosmiques », persuadé,

de par une vision métaphysique du cosmos, qu'il s'agissait de photons  $\gamma$  de haute énergie, messagers de la création continue de nouveaux atomes dans l'espace interstellaire et intergalactique d'un Univers stationnaire.

Dans ce contexte, deux instruments allaient jouer un rôle central dans l'étude du rayonnement cosmique : la chambre à brouillard et les compteurs Geiger-Müller. Le premier, inventé par Wilson en 1911, permettait de visualiser le passage de particules ionisantes sous la forme de traînées de condensation au sein d'une enceinte remplie d'un gaz saturé de vapeur. En y appliquant un intense champ magnétique à l'aide d'électroaimants, il était alors possible de trier les particules en fonction du signe de leur charge électrique, et le rayon de courbure permettait d'estimer leur énergie cinétique, comme le fit le physicien russe Dimitri Skobeltsyn en 1927. Il fut ainsi le premier à proposer que les particules chargées relativistes qu'il avait observées étaient la manifestation des rayons cosmiques au cours de leur traversée dans l'atmosphère. En 1928, les physiciens allemands Hans Geiger et Walther Müller mirent au point un nouvel instrument, basé sur le principe de fonctionnement des chambres d'ionisation constituées d'une enceinte remplie de gaz à l'intérieur de laquelle se trouve un fil métallique relié à un générateur électrique et d'un électromètre permettant de mesurer le courant généré par le passage d'une particule ionisante. Ces fameux compteurs Geiger, simples d'utilisation et à réponse rapide, d'usage courant encore aujourd'hui, furent employés par paire la même année par Walther Bothe, qui mit alors en évidence la détection par coïncidence. Dès 1929, suite à une expérience restée célèbre, menée avec Werner Kolhörster (celui-là même qui monta en ballon à plus de 9 km d'altitude quinze ans auparavant) et mettant en scène deux compteurs Geiger disposés de part et d'autre d'un empilement de plaques d'or, de plomb et d'acier, ils démontrèrent que le gros des rayons cosmiques mesurés sur Terre était constitué de particules de matière, chargées électriquement, et d'énergie très élevée.

Il restait maintenant à révéler la nature de ces rayons cosmiques à leur entrée dans l'atmosphère. Un jeune physicien américain, Arthur Compton, mit sur pied au début des années 1930 huit expéditions vers soixante-neuf stations de mesure dispersées à la surface de la Terre (entre 78° N et 46° S de latitude, 175° E et 173° O de longitude et jusqu'à 6 000 m d'altitude), impliquant plus de soixante scientifiques ! À chaque station, se trouvait un dispositif expérimental identique, sous la forme d'une chambre d'ionisation

remplie d'argon et connectée à un électromètre, le tout étalonné avec une même source radioactive de référence. Dès 1932, il démontrait que l'intensité du rayonnement cosmique était plus grande aux hautes latitudes qu'à l'équateur, quelle que soit l'altitude, et que la variation mesurée s'ajustait mieux avec la latitude géomagnétique que géographique<sup>5</sup>. Cet effet en latitude fut confirmé par d'autres campagnes de mesures, dont celle menée en 1933 par Pierre Auger et Louis Leprince-Ringuet lors d'un voyage de deux mois à bord du Kerguelen entre Le Havre et Buenos Aires. Le rayonnement cosmique, à son arrivée dans la haute atmosphère, était donc fait de corpuscules électrisés, sensibles au champ magnétique terrestre, ce qui contredisait la théorie de Millikan et de ses rayons  $\gamma$ , électriquement neutres<sup>6</sup>. Fin décembre 1932, Compton et Millikan s'affrontèrent verbalement lors d'une réunion, et cette virulente controverse à propos de la nature des rayons cosmiques fit même la une du grand quotidien américain *The New York Times*.

### Quelles particules pour ces « rayons » ?

À l'exception de Millikan, les physiciens du début des années 1930 s'accordaient sur la nature corpusculaire des rayons cosmiques dits « primaires », à leur entrée dans l'atmosphère. Restait à savoir le signe des charges électriques (positives ou négatives ?) emportées par ces particules cosmiques. Tout comme pour la variation en latitude expliquée par l'effet du champ magnétique terrestre sur les trajectoires des particules chargées, il devait également exister un effet « est-ouest ». D'après les travaux de Carl Störmer, Georges Lemaître & Manuel Vallatra, le flux de charges positives (négatives) devait être plus intense en direction de l'ouest (de l'est), et ce particulièrement dans les régions équatoriales. Quelques mois après les mesures de Bothe et Kolhörster, un jeune physicien italien, Bruno Rossi, améliora la méthode de détection par coïncidence en développant un circuit électronique capable de détecter de multiples coïncidences avec une excellente résolution temporelle et ainsi, de remonter à la trajectoire de la particule ionisante suivant la configuration géométrique de l'expérience, tout en

5 Notons que le physicien néerlandais Jacob Clay avait déjà mesuré une baisse d'intensité proche de l'équateur lors de deux voyages entre l'Europe et Java, en 1927 et 1929, mais ses résultats ne purent être confirmés par d'autres expéditions scientifiques menées à la même époque.

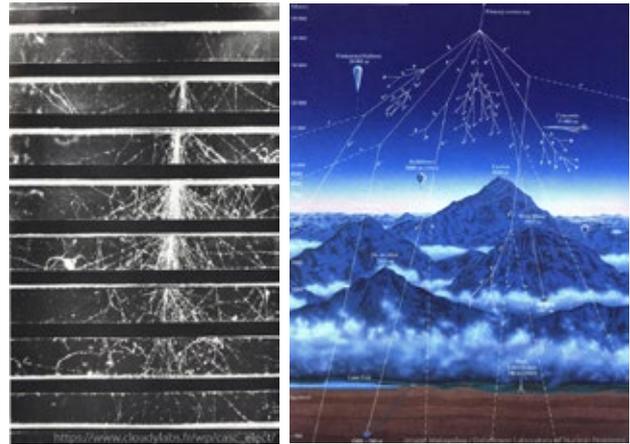
6 Le terme de « rayons cosmiques », quelque peu trompeur mais imposé par un scientifique influent en son temps du haut de son statut de prix Nobel, a parcouru l'histoire jusqu'à aujourd'hui...

réduisant considérablement le taux de coïncidences fortuites. Entre 1931 et 1933, plusieurs groupes de physiciens mirent alors en œuvre ces « télescopes » à compteurs Geiger et menèrent des campagnes de mesure de par le monde. Luis Alvarez et Arthur Compton, Thomas Johnson au Mexique, et Bruno Rossi en Erythrée, démontrèrent que la grande majorité des rayons cosmiques primaires étaient des particules chargées positivement. La communauté scientifique en conclut alors qu'il s'agissait de protons, noyaux d'hydrogène, l'élément le plus abondant dans l'Univers.

À la même époque, Rossi constata que trois compteurs Geiger, disposés de façon à ce qu'une seule particule ionisante ne pouvait les traverser tous les trois, étaient déclenchés en coïncidence à un taux supérieur à celui attendu. Il qualifia alors ces groupes de particules de « vastes essaims » (*estesi sciami*), ce que Patrick Blackett et Guisepe Occhialini venaient de découvrir sous la forme d'une « pluie » de traces au sein de leur chambre à brouillard encadrée par des compteurs Geiger, et qu'ils dénommèrent « douches » (*showers*) de particules secondaires « se produisant quand la radiation ionisante traverse la matière » (figure 4a).

Alors que Homi Bhabha et Walter Heitler venaient de développer la théorie des cascades électromagnétiques pour expliquer ces observations, Pierre Auger développa en 1938 à l'IBPC à Paris un dispositif expérimental similaire à celui de Rossi mais dont le circuit électronique avait été amélioré par Roland Maze afin d'atteindre un pouvoir de résolution temporelle de l'ordre de quelques microsecondes. Au travers de mesures systématiques avec différents arrangements de compteurs, depuis la montagne Sainte-Geneviève à Paris jusqu'au Pic du Midi et au laboratoire installé au Jungfraujoch en Suisse, il mit alors en évidence l'existence des « grandes gerbes cosmiques atmosphériques contenant des corpuscules ultra-pénétrantes », couvrant une superficie allant jusqu'à 1 km<sup>2</sup> ! En comprenant que celles-ci étaient issues de l'interaction à haute altitude d'une seule particule extrêmement énergétique avec les noyaux des atomes de l'air, il en conclut que les rayons cosmiques primaires pouvaient transporter une énergie colossale de l'ordre du petaélectronvolt (1 PeV = 10<sup>15</sup> eV), soit un milliard de fois plus grande que celles typiquement mises en jeu dans les processus de radioactivité naturelle ! Les découvertes des années 1930, et notamment celle des grandes gerbes atmosphériques (figure 4b) constituées d'une foultitude de particules aux propriétés encore inconnues, permirent alors

l'émergence d'un nouveau pan de la physique connu de nos jours sous le nom de physique des particules.



**Fig.4a.** À gauche : photographie d'une cascade électromagnétique initiée par un photon d'environ 4 GeV au sein d'une chambre à brouillard contenant 8 plaques de plomb de 1,3 cm d'épaisseur.

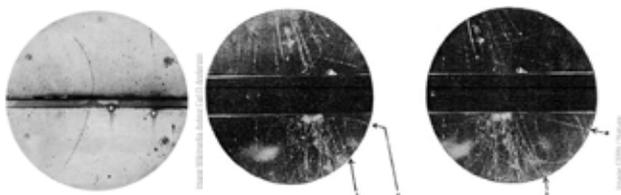
**Fig.4b.** À droite : schéma du développement d'une grande gerbe atmosphérique issue de l'interaction d'un rayon cosmique dit « primaire » (dont l'énergie dépasse les 10<sup>20</sup> eV, soit environ 20 J, pour les plus énergétiques d'entre eux !) avec les noyaux des atomes de l'air. La cascade des quelques dizaines de milliards de particules secondaires ainsi générées comporte trois composantes dites hadronique (pions, neutrons, protons), électromagnétique (photons, électrons et positrons), et muonique (muons et neutrinos).

## Port-folio de nouvelles particules...

En 1932, le physicien américain Carl Anderson, au sein du laboratoire Caltech dirigé alors par Millikan, remarqua, sur un de ses clichés photographiques (figure 5a), une trace en tout point identique à celle laissée par un électron, mais dont la charge était... positive ! La découverte de l'anti-électron, baptisé « positron » (ou positon en français)<sup>7</sup>, initia l'étude du rayonnement cosmique dans le domaine naissant de la physique des particules. Cette découverte fut confirmée au cours de la même année par Blackett et Occhialini qui mettaient en évidence le processus de création de paires électron-positron, et confirmaient ainsi la théorie des antiparticules élaborée en 1928 par Paul Dirac. Par la suite, Anderson et son doctorant Seth Neddermeyer décidèrent d'emmener leur dispositif expérimental à 4300 m d'altitude, au sommet du Pikes Peak dans le Colorado, afin d'obtenir plus de données sur les rayons cosmiques. En 1936, ils identifièrent alors sur les clichés des traces laissées par des particules des deux signes mais dont la masse se situait entre celle de l'électron et celle du proton, et baptisèrent ces particules de masse intermédiaire des « mésotrons », dénommées

<sup>7</sup> et qui vaudra à Anderson le prix de Nobel de physique en 1936 conjointement avec Hess.

plus tard « mésons ». Ils ouvraient ainsi la voie à une fructueuse série de découvertes portant sur ces particules de masse intermédiaire. L'existence d'un méson très pénétrant, dénommé méson  $\mu$  (puis « muon » puisqu'il s'agit d'un lepton, environ deux cent fois plus lourd que l'électron), fut confirmée dès 1937 par Jabez Street et Edward Stevenson. Suite au second conflit mondial, les physiciens mirent en œuvre une nouvelle technique de détection basée sur des plaques photographiques d'émulsions nucléaires adaptées à la détection des particules, dont les traces pouvaient s'examiner en détail au microscope. Au sein du laboratoire de physique de l'Université de Bristol, Cecil Powell, Giuseppe Occhialini et leurs collègues découvrirent, en 1947, par une série de mesures au Pic du Midi et dans les Andes boliviennes, des événements constitués d'une première particule de type méson dont la trace s'arrêtait net dans l'émulsion et d'où repartait une deuxième trace due à un autre méson. Ils postulèrent alors l'existence d'une nouvelle particule de masse intermédiaire, dénommée méson  $\pi$  ou « pion », qui s'était alors désintégré en un muon, et comprirent qu'il s'agissait de ces particules prédites en 1935 par Hideki Yukawa au sein de sa théorie des forces nucléaires. La même année, Clifford Butler et George Rochester annoncèrent la découverte d'une nouvelle particule de masse intermédiaire neutre, la première des particules dites « étranges », le méson  $K$  ou « kaon », qui décroissait en deux pions chargés (figure 5b).



**Fig.5.** Photographies dans des chambres à brouillard révélant le positron (à gauche-a) et le kaon (au milieu et à droite-b). Le positron, arrivé dans la chambre par en bas avec une énergie de 63 MeV, présente une courbure (sous l'effet d'un champ magnétique perpendiculaire au plan de l'image), plus marquée après avoir traversé la plaque de plomb intercalée au milieu (énergie en sortie de 23 MeV). La longueur de parcours après traversée est environ dix fois plus grande que celle attendue par un proton de même énergie. Le kaon est mis en évidence par les traces « fourchues » (en forme de « V ») notées a et b qui correspondent aux particules plus légères (notamment des pions) issues de sa décroissance.

Et en 1948, ces mêmes émulsions photographiques, embarquées à bord de vols stratosphériques à près de 30 km d'altitude, permirent à Helmut Bradt et Bernard Peters d'identifier au sein des rayons cosmiques primaires, outre les abondants protons formant les noyaux d'hydrogène, des noyaux

d'éléments plus lourds tels que l'hélium, le carbone, l'azote et l'oxygène, hautement énergétiques.

Les découvertes de ces nouvelles particules, à l'instar de « l'hypéron » révélé au Pic du Midi de Bigorre et baptisé par Louis Leprince-Ringuet en 1953<sup>8</sup>, étaient les dernières à mettre au crédit du rayonnement cosmique, seul moyen d'étudier ce « bestiaire » jusqu'à l'avènement des premiers grands accélérateurs de particules au début des années 1950. Déjà en 1948, le cyclotron de Berkeley permettait de produire les premiers pions en laboratoire, et les machines suivantes s'engagèrent dans une course à la production de particules toujours plus énergétiques dont les collisions permirent d'en découvrir de nouvelles, élémentaires (quarks et neutrinos) ou composites, au sein de centres de recherche internationaux nouvellement créés, tels que le Cern<sup>9</sup> en 1954. Une scission venait ainsi de s'opérer entre les cosmiciens : d'un côté, ceux qui s'orientèrent vers des expériences installées auprès des grands accélérateurs afin de percer les mystères du monde subatomique, et de l'autre, ceux qui s'élançèrent dans la conquête spatiale naissante pour traquer les rayons cosmiques au-delà de l'atmosphère afin d'en découvrir l'origine.

Aujourd'hui, la scission s'est faite fusion, le domaine dit des « astroparticules », à l'intersection entre physique des particules, astrophysique et cosmologie, regroupe des chercheurs de tout bord, héritiers de cette riche histoire du rayonnement cosmique, et travaillant sur des instruments de plus en plus complexes, au sein de vastes collaborations internationales et dont les noms (Fermi, Hess, Auger) traduisent la filiation avec les cosmiciens du siècle passé. De nouvelles fenêtres astronomiques, photons gamma de haute et très haute énergie, neutrinos, ondes gravitationnelles et rayons cosmiques d'ultra-haute énergie, ont vu le jour ces dernières décennies. Ces messagers nous renseignent sur les phénomènes célestes les plus violents connus dans l'Univers, tous candidats au titre de sources de rayons cosmiques : sursauts gamma, noyaux actifs de galaxies, explosions stellaires (supernovae) et leurs vestiges, pulsars et autres magnétars, mais cela est une autre histoire... toujours en cours de rédaction !

■

<sup>8</sup> Lors de la 3e édition de l'ICRC, conférence internationale sur le rayonnement cosmique, à Bagnères-de-Bigorre.

<sup>9</sup> Aujourd'hui dénommé Organisation européenne pour la recherche nucléaire.