

ANNALES DE L'I. H. P.

ROBERT A. MILLIKAN

Sur les rayons cosmiques

Annales de l'I. H. P., tome 3, n° 4 (1933), p. 447-464

http://www.numdam.org/item?id=AIHP_1933__3_4_447_0

© Gauthier-Villars, 1933, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « *Annales de l'I. H. P.* » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

SUR LES RAYONS COSMIQUES

PAR

Robert A. MILLIKAN

J'ai l'intention de discuter ici l'état actuel des hypothèses que l'imperfection de nos connaissances nous permet de faire en réponse aux deux questions suivantes :

1^o Où se produisent les rayons cosmiques ?

2^o Que sont-ils et quelle sorte de phénomène leur donne naissance ?

I. — LIEU DE PRODUCTION DES RAYONS COSMIQUES

En ce qui concerne la première question, il existe trois différentes sortes de faits, dont chacune semble conduire indépendamment à la même conclusion quant au lieu d'origine de ces rayons, qui serait placé dans l'espace interstellaire.

I. UNIFORMITÉ DE LEUR DISTRIBUTION. — Le premier fait est le suivant. Dans les limites de mes propres incertitudes expérimentales [qui se réduisent actuellement à environ 0,30 % ⁽¹⁾], ni le soleil, ni la Voie Lactée, ni aucun autre corps céleste ne semble exercer une influence quelconque sur l'intensité des rayons cosmiques ; les mesures très exactes faites par HOFFMANN ⁽²⁾ à Halle s'accordent avec cette conclusion. En d'autres termes et en première approximation, les rayons cosmiques nous viennent certainement de la voûte céleste avec une distribution uniforme.

⁽¹⁾ R. A. MILLIKAN, *Phys. Rev.*, t. XXXIX, 1^{er} février 1932, p. 391.

⁽²⁾ HOFFMANN, *Zeitsch. für Physik.*, t. LXIX, 1931, p. 704.

Ce seul fait veut dire que ces rayons ne peuvent être dûs à une propriété commune à toute matière, par exemple une destruction de protons et d'électrons qui se produirait dans les noyaux continuellement et indépendamment de la température ; en effet, dans ce cas le soleil devrait exercer une influence énorme sur l'intensité des rayons observés. Il semble possible d'échapper à cette conclusion en admettant que, dans quelque direction que l'on regarde la voûte céleste, la densité de matière soit suffisante pour absorber tous les rayons cosmiques (il suffirait qu'elle corresponde à la valeur de 100 mètres d'eau). La direction du soleil n'aurait alors aucun avantage sur les autres directions, et l'on expliquerait ainsi l'uniformité de répartition des rayons sur l'hémisphère qui se trouve au-dessus denous.

Mais que dire de l'hémisphère situé au-dessous ? Le fait constaté tout d'abord par CAMERON et moi-même ⁽¹⁾, d'une diminution graduelle de l'intensité, quand on s'enfonce au-dessous de la surface de l'eau provenant de la fonte des neiges (diminution allant jusqu'à une valeur limite, ou jusqu'à zéro pour de grandes profondeurs), auraient comme origine l'hypothèse précédente, à savoir que les rayons proviendraient d'une propriété générale de la matière. On pourrait, il est vrai, supposer arbitrairement que pour une raison inconnue l'eau constitue une exception à la règle de la destruction nucléaire. Mais, même dans ce cas, les rayons produits dans les substances situées au-dessous de l'eau pénétreraient dans celle-ci en venant du fond, avec le même pouvoir pénétrant que les rayons qui viennent du dessus. Ceci est absolument contraire aux faits. L'expérience a été faite avec beaucoup de soin par CAMERON et moi-même dans le lac Arrowhead ; nous n'avons trouvé aucun accroissement d'intensité en nous approchant du fond, même lorsque nos instruments arrivaient à une distance de celui-ci assez faible pour que la radioactivité du fond du lac puisse se faire sentir. Les rayons gamma radioactifs ne peuvent traverser qu'un peu plus de 1 mètre d'eau avant d'être pratiquement absorbés.

Le fait d'une distribution uniforme des rayons cosmiques au-dessus de nous, mais non au-dessous, signifie donc que ceux-ci ne peuvent être dûs à une propriété générale intrinsèque de la matière ; cela signifie seulement que, quelle que puisse être le mode de production de ces rayons, *les conditions existant à la surface de la terre sont tout à fait défavorables à leur formation.*

(1) MILLIKAN et CAMERON, *Phys. Rev.*, t. XXVIII, 1926, p. 866.

SUR LES RAYONS COSMIQUES

L'absence d'un effet calorifique montre elle aussi, d'un point de vue tout à fait différent, que ces rayons ne peuvent se former à l'intérieur de la terre. Si l'on élimine cette possibilité, il résulte de l'uniformité de leur distribution sur l'hémisphère qui se trouve au-dessus de nous, que les conditions réalisées dans l'atmosphère du soleil sont également défavorables. De même pour la Voie Lactée : et aussi avec une forte probabilité (qui n'est cependant pas une certitude absolue) pour les étoiles extra-galactiques.

On pourrait éviter cette dernière conclusion en faisant la supposition *ad hoc*, que, sur la voûte céleste, il existe une répartition uniforme de galaxies, dont chacune se conduirait tout à fait différemment de la nôtre dans cette circonstance. Mais les seules différences de conditions physiques que l'on puisse raisonnablement imaginer sont des différences de température et de pression. De très hautes températures et de très hautes pressions existent à l'intérieur comme à l'extérieur de notre galaxie ; et, si elles constituent des conditions favorables, on devrait en percevoir l'effet dans les observations faites sur la Voie Lactée. La supposition la plus raisonnable que l'on puisse faire pour rendre compte de l'uniformité de la distribution est donc visiblement la suivante : *les rayons cosmiques proviennent de portions de l'univers où la température et la pression sont excessivement faibles*. Nous prendrons ces conditions comme définition de l'espace interstellaire, aussi bien dans notre galaxie, que dans les autres et aussi entre les diverses galaxies.

En un mot, les conditions terrestres, celles qui existent dans l'atmosphère du soleil, des étoiles de la Voie Lactée et probablement des autres étoiles, semblent défavorables à la formation de rayons cosmiques. *Le fait de l'uniformité de distribution des rayons cosmiques nous oblige à chercher leur origine dans l'espace interstellaire, où les conditions de température et de pression sont entièrement différentes de celles qui existent sur la terre ou dans l'atmosphère des étoiles.*

2. INFLUENCE DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE. — Le deuxième fait qui oblige à placer l'origine des rayons cosmiques dans l'espace interstellaire est que [dans les limites de mes propres incertitudes expérimentales, qui sont ici de 1 % ⁽¹⁾], l'intensité des rayons cos-

(1) R. A. MILLIKAN, *Phys. Rev.*, t. XXXVI, 1930, p. 1595.

miques pour une même hauteur barométrique est la même à Churchill (Manitoba) à 10° du pôle magnétique Nord, qu'à Pasadena, à 36° de ce pôle ; d'autre part, les expériences entreprises par le Dr CAMERON et moi-même n'ont pu déceler aucune influence de la latitude dans des mesures faites sur mer de façon continue entre le 34° degré Nord et le 15° degré Sud. Ces anciennes observations, toutefois, étaient moins exactes, notre incertitude maxima étant environ 6 % (1).

Ce faible effet du champ magnétique terrestre signifie que plus de 90 % des rayons qui pénètrent jusqu'au niveau de la mer ne peuvent être ni des rayons β (électrons négatifs), ni des protons (électrons positifs) car EPSTEIN (2) a montré que même des rayons β de un billion de volts (10^9) seraient déviés par le champ magnétique terrestre à tel point qu'aucun d'entre eux ne pourrait frapper la surface de la terre à plus de 30° du pôle magnétique. La déviation des protons serait seulement un peu moindre, et aurait été facilement décelée par mes expériences au voisinage du pôle. Il ne reste plus qu'une seule hypothèse raisonnable ; à savoir, que plus de 90 % des rayons incidents atteignant le niveau de la mer seraient formés de rayons γ , c'est-à-dire des photons.

Mais ces indications vont encore plus loin et permettent de conclure que ces photons, quand ils pénètrent dans le champ terrestre ne sont pas encore en équilibre, ni avec leurs rayons β secondaires, ni avec les protons rapides, ce qui aurait dû découler de leur passage à travers de la matière, c'est-à-dire de leur rencontre avec des électrons ou des noyaux. De tels rayons corpusculaires secondaires (on le démontrerait actuellement par des expériences directes), ont des énergies de l'ordre de 1 à 1.000 millions de volts, et un peu plus peut-être dans certains cas. Ils devraient produire, par leur entrée dans l'atmosphère, puisque certains d'entre eux pénètrent même jusqu'au niveau de la mer, des effets observables au moyen d'un électroscope aussi bien au niveau de la mer que sur des sommets de montagnes comme Pike's Peak (lat. 39° , alt. 4.310 m.), le lac Louise (lat. 51° , alt. 1.740 m.), le

(1) Nous avons répété ces observations, le Dr NEHER et moi, avec des instruments très précis et nous avons récemment trouvé (Décembre 1933) qu'en allant par mer de Mollendo, Pérou, (Latitude 17° S.) à New-York (Lat. 41° N.) l'intensité des rayons cosmiques augmente de 6,8 %. D'autre part, nos observations faites en avion, à 6.400 mètres d'altitude, ont donné au Pérou et à Panama, des résultats de près de 40 % inférieurs à ceux obtenus dans le nord des États-Unis.

(2) Paul S. EPSTEIN, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, t. XVI, 1930, p. 658.

SUR LES RAYONS COSMIQUES

mont Manitou (lat. 39° , alt. 2.640 m.), sur lesquels j'ai fait des mesures. En fait, bien que les observations faites à Churchill sans écran de plomb, donnaient les résultats les plus bas que j'aie jamais trouvés (soit 45 ions au lieu de 90 à Pasadena) ⁽¹⁾, ils étaient encore, avec un écran de plomb de 7,6 cm., les mêmes qu'à Pasadena (28,3 ions $\text{cm}^2 : \text{s}$) pour une même hauteur barométrique. Et les observations faites avec un écran sur des sommets de montagnes ⁽²⁾, aussi bien qu'au niveau de la mer, se sont trouvées tout à fait indépendantes de la latitude, entre 34° et 51° de latitude, c'est-à-dire entre 37° et 19° du pôle magnétique.

Il n'y a donc, dans ces observations, aucune indication sur le fait que des électrons ou des protons secondaires possédant les énergies observées aient traversé le champ magnétique terrestre, et atteint la surface de la terre près des pôles. Au contraire, les résultats des expériences au niveau de la mer correspondent toujours à des rayons dont près de 93 % entrent dans le champ magnétique terrestre à l'état de rayons γ , ou photons, qui ne sont pas encore en équilibre avec leurs rayons secondaires, car dans ce cas une grande partie devrait être formée de rayons corpusculaires. Or, si ce sont des photons si près d'être purs, ils ne peuvent, avant d'atteindre l'atmosphère terrestre, avoir déjà traversé une épaisseur de matière comparable à celle de cette atmosphère. Ceci veut dire qu'ils *doivent avoir leur origine dans les espaces interstellaires*, ce terme ayant été déjà défini comme un lieu tel que les rayons n'aient pas à traverser une épaisseur de matière appréciable avant d'atteindre notre atmosphère. On ne peut faire entièrement confiance à ces seules indications, et il faudra répéter ces expériences à de plus hautes altitudes, comme BOWEN et moi-même nous préparons à le faire. Ces résultats constituent cependant, dès maintenant, des indications, qui sont grandement confirmées par un troisième fait, qui plaide fortement en faveur de l'origine précitée.

3. EXISTENCE D'UN MAXIMUM DANS LE COEFFICIENT D'ABSORPTION EN FONCTION DE LA PROFONDEUR. — Ce troisième fait fut découvert dans le vol en ballon à haute altitude, avec des électroscopes enregistreurs, que BOWEN et moi fîmes en 1922 ⁽³⁾ et dans lequel nous avons

(1) R. A. MILLIKAN, *Phys. Rev.*, t. XXXVI, 1930, p. 1597.

(2) MILLIKAN et CAMERON, *Phys. Rev.*, t. XXXVII, 1931, p. 244.

(3) MILLIKAN et BOWEN, *Carnegie Institution of Washington Year Book.*, t. XXI, 1922, p. 385 ; *Phys. Rev.*, t. XXII, 1923, p. 198 ; *Idem.*, t. XXVII, 1926, p. 353.

obtenu un excellent enregistrement de la vitesse de décharge de l'électroscope, jusqu'à une altitude de près de 16 kilomètres. Cet enregistrement montre d'après nous, définitivement et sans ambiguïté, que l'ionisation dans un électroscope fermé ne continue pas à augmenter exponentiellement avec l'altitude jusque dans le haut de l'atmosphère, comme il se devrait si les rayons incidents étaient des courants de forte énergie *a)* d'électrons négatifs ou *b)* d'électrons positifs, ou *c)* de rayons γ en équilibre avec leurs rayons secondaires. Au contraire, le coefficient d'absorption passe par un maximum à une altitude comprise entre 9 et 16 kilomètres, puis retombe à des valeurs plus faibles. Cet aspect est précisément celui qu'on devait attendre si les rayons pénétraient dans l'atmosphère terrestre à l'état de rayons γ qui seraient obligés de pénétrer à une certaine profondeur dans l'atmosphère avant de se trouver en équilibre avec leurs secondaires.

Comme je l'ai déjà dit, nous nous préparons en ce moment, BOWEN et moi, à répéter ces expériences à différentes latitudes. En effet, si les rayons, au moment de pénétrer dans l'atmosphère, sont pour la plupart des photons (ainsi que l'indiquent nos propres expériences et celles de PICCARD, qui semblent confirmer nos résultats), la seule interprétation semble en être qu'en allant de leur lieu d'origine à la terre, ils n'ont pas encore traversé une quantité de matière comparable en épaisseur à l'atmosphère terrestre. Cela signifie encore une fois que leur lieu d'origine doit être l'espace interstellaire.

Il faudra faire un plus grand nombre d'observations que celles déjà faites par BOWEN et moi-même, à 16 kilomètres et plus, et à différentes latitudes pour renforcer ces preuves : nous n'avons peut-être là, en effet, qu'une probabilité ; car il découle d'un échange de vues que j'ai eu récemment avec le professeur KUHLENKAMPF à Munich que les rayons pourraient entrer dans le champ magnétique terrestre en équilibre avec leurs secondaires et que ceux-ci ne pourraient pénétrer jusqu'à la surface de la terre dans les régions équatoriales tandis qu'au contraire ils pourraient entrer dans les régions polaires. Ce ne serait donc qu'à de plus faibles latitudes qu'on trouverait une altitude d'ionisation maximum, tandis qu'à des latitudes plus hautes, la vitesse d'ionisation en fonction de l'altitude croîtrait de façon continue. De toutes façons nous espérons, le D^r BOWEN et moi, obtenir d'autres données expérimentales relatives à ce point.

Le point précédent est de la plus haute importance cosmologique,

SUR LES RAYONS COSMIQUES

puisque la vue d'un observateur terrestre regardant dans un univers sphérique d'EINSTEIN devrait rencontrer une quantité de matière indéfinie, dans n'importe quelle direction D'après cette conception, le regard devrait tourner indéfiniment dans cet univers, de sorte que les rayons pénétrant dans l'atmosphère terrestre devraient être déjà en équilibre avec leurs secondaires. Le fait qu'il n'en est pas ainsi (qu'il soit vérifié au moyen de vols à haute altitude en ballon, ou par des mesures sur les effets du champ magnétique terrestre), acquiert alors un énorme intérêt au point de vue cosmologique. Toutes les théories qui voudraient voir l'origine des rayons cosmiques dans un processus unique, situé dans le passé, processus créant des rayons qui auraient déjà voyagé dans un univers sujet au « déplacement vers le rouge » (hypothèse de ZWICKY), semblent mener à des rayons qui seraient en équilibre avec leurs secondaires au moment d'atteindre la terre. Mais, même si l'on ne considère pas ce point comme complètement établi, les preuves précédentes sont dans leur ensemble si convaincantes, qu'elles rendent l'hypothèse de l'espace interstellaire de loin la meilleure que nous puissions faire sur *le lieu* d'origine des rayons cosmiques.

On soulève continuellement l'objection suivante : est-il bien établi que les rayons cosmiques n'aient pas leur origine dans notre propre atmosphère ? La réponse est qu'ils ne prennent certainement pas naissance dans la partie la plus basse de celle-ci, puisqu'on a montré qu'elle était aussi inerte que l'eau des lacs provenant de la fonte des neiges, et équivalente à une même masse de cette eau⁽¹⁾. D'autre part, il est bien improbable, bien que peut-être pas complètement impossible, que l'on puisse trouver plus haut de nouvelles conditions, en un point dont on ne puisse pas encore dire s'il appartient ou non en propre à l'espace interstellaire. Cependant, un argument encore plus fort est le suivant : il n'y a presque aucun phénomène ayant lieu dans les régions les plus éloignées de notre atmosphère, qui n'existe aussi, et en plus grande abondance, dans les régions les plus extérieures de l'atmosphère du soleil. Le fait qu'on ne puisse pas déceler une intensité plus forte le jour, quand ces deux atmosphères coopèrent, que la nuit quand l'atmosphère terrestre est seule à agir, est une preuve très concluante contre l'hypothèse en question.

(1) MILLIKAN et CAMERON, *Phys. Rev.*, t. XXVIII, 1926, p. 866.

Les relations énergétiques indiquées dans le chapitre suivant s'y opposent également.

II. — MODE DE PRODUCTION DES RAYONS COSMIQUES

Examinons maintenant l'état actuel de nos hypothèses concernant le mode de production des rayons cosmiques. Ici encore, nous nous guiderons sur quatre faits expérimentaux principaux, et tout un groupe d'autres faits d'une moindre importance.

I. STRUCTURE DE BANDES. — Le premier de ces faits est la structure de bandes que présentent ces rayons. Les premiers, CAMERON et moi nous avons pu déduire cette structure de bandes de nos expériences de 1925 ⁽¹⁾, mais, les premiers faits significatifs qui nous mirent sur la voie furent les résultats du vol à haute altitude que nous fîmes en ballon, BOWEN et moi, en 1922. Dans ce vol, nous sommes parvenus à utiliser l'équivalent de 110 centimètres d'eau des couches extrêmes de l'atmosphère, l'atmosphère toute entière étant équivalente à 10 mètres d'eau. Étant donné d'une part que 3 % des rayons γ du radium traversent 1 mètre d'eau, et que d'autre part, notre électroscope, au lieu de se décharger très rapidement à cette altitude, montra une diminution du coefficient d'absorption, au lieu d'une augmentation, nous voyons qu'il ne peut entrer dans l'atmosphère terrestre ni rayons γ du radium, ni aucune radiation ayant un pouvoir pénétrant compris entre celui des rayons γ et celui des rayons cosmiques les moins pénétrants, avec des intensités comparables à celle de ces derniers. La bande la moins pénétrante ionise fortement à 9 kilomètres, et paraît passer par un maximum avant d'atteindre le haut de l'atmosphère. Il y a là une forte présomption à ce qu'il existe une bande limitée très brusquement du côté des grandes longueurs d'onde.

Plus tard, la courbe d'ionisation en fonction de la profondeur prise par CAMERON et moi-même a été décomposée par nous en quatre bandes, dont la moins pénétrante est la moins incertaine, et comprend la plus grande partie de l'énergie qui tombe dans notre atmosphère. Cette bande, d'après notre calcul, est cinq fois plus pénétrante que les rayons γ les plus durs que l'on connaisse, ceux du Th C, et notre calcul s'accorde

SUR LES RAYONS COSMIQUES

très bien avec le pouvoir pénétrant observé directement par HESS ⁽¹⁾ KOLHÖRSTER ⁽²⁾ à des altitudes de 6 à 9 kilomètres, où les composantes les plus pénétrantes n'influent que très peu sur les coefficients d'absorption observés.

HESS et KOLHÖRSTER observèrent directement un pouvoir pénétrant égal à environ six fois celui du Th C. Étant donné la faible influence à cette altitude des composantes les plus pénétrantes, qui diminuent le coefficient d'absorption observé, les mesures de HESS et KOLHÖRSTER sont en excellent accord avec notre calcul.

Nous pouvons maintenant obtenir, sans faire intervenir aucune théorie, au moins un ordre de grandeur de l'énergie de ces composantes cinq fois plus pénétrantes que les rayons γ les plus durs, par extrapolation de la courbe empirique reliant le pouvoir pénétrant à l'énergie (ou à la fréquence), courbe qui a été déterminée avec précision jusqu'à 2.500.000 V. Une telle extrapolation donne une énergie d'environ 30 millions de volts, pour un pouvoir pénétrant de cinq fois celui du Th C.

2. L'ÉQUATION D'EINSTEIN. — Le second des faits importants indiqués plus haut est que, d'après l'équation d'EINSTEIN, $T = mc^2$, l'énergie libérée dans la formation de l'hélium à partir de quatre atomes d'hydrogène est très exactement 27.640.000 V. De sorte que, si l'on admet que les rayons cosmiques sont formés dans des régions telles qu'ils n'aient pas à traverser une quantité appréciable de matière avant d'atteindre l'atmosphère terrestre (ce que nous avons pris plus haut comme l'hypothèse la plus probable), on sera forcé d'admettre que la bande la moins pénétrante est due à une formation continue de l'hélium à partir d'hydrogène, dans l'espace interstellaire.

Il n'y a que deux hypothèses que l'on ait suggérées pour échapper à cette conclusion. La première est que les rayons cosmiques pourraient provenir d'une chute d'électrons, négatifs ou positifs, à travers un champ électrique cosmique, d'une différence de potentiel suffisante pour leur communiquer le pouvoir pénétrant voulu. Cette hypothèse me semble rencontrer des difficultés insurmontables :

1° Elle est en opposition avec le fait bien établi plus haut, que les

⁽¹⁾ HESS, *Phys. Zeitsch.*, t. XII, 1911, p. 998 ; t. XIII, 1912, p. 1084.

⁽²⁾ KOLHÖRSTER, *Phys. Zeitsch.*, t. XIV, 1913, p. 1153 ; *Verh. d. Deut. phys. Ges.*, 30 juillet 1914.

rayons qui pénètrent l'atmosphère terrestre ne sont ni des électrons, ni des protons, mais pour la plupart des photons ;

2° De tels champs électriques, s'ils existaient devraient être symétriques par rapport à la terre, et avoir des valeurs s'élevant à quelques centaines de millions de volts (voir plus haut) ; de sorte que cette hypothèse semblerait être bien près d'un retour à la théorie géocentrique de l'Univers, supposition satisfaisante 1.500 ans avant J.-C. mais qui n'est guère acceptable depuis ;

3° Ce ne serait qu'à l'aide des hypothèses les plus arbitraires et les plus anti-naturelles qu'on pourrait rendre de tels champs capables de produire la structure de bandes observée dans le spectre des rayons cosmiques, tandis qu'une telle structure suggère dès l'abord, comme dans le cas de toutes les raies ou bandes spectrales, une transformation atomique continuellement renouvelée ;

4° L'existence même d'un champ terrestre aussi considérable semble incompatible avec le faible champ qui existe réellement autour de la terre, champ qui est négatif à sa surface, et qui a une valeur totale d'environ 1 million de volts.

La seconde supposition que l'on ait faite pour échapper à l'hypothèse d'une transformation atomiques consiste à suggérer que la cause des rayons observés serait une annihilation. Mais on peut faire à cette supposition, les trois sérieuses objections suivantes :

1° Cette cause ne rendrait pas compte de la structure de bandes ; à moins que non seulement de simples protons, mais encore des atomes entiers, et des atomes aussi lourds que ceux de l'oxygène, ne soient annihilés d'un seul coup. Les énergies émises seraient alors incroyablement grandes, beaucoup plus grandes qu'elles ne semblent être en réalité (voir ci-dessous les expérience d'ANDERSON) ;

2° Pour rendre compte de l'uniformité de distribution des rayons cosmiques, il serait nécessaire d'admettre une telle annihilation de protons — processus nucléaire — *seulement* dans les espaces interstellaires. Cela est extrêmement improbable, sinon tout à fait impossible. Il existe des circonstances, à l'intérieur des étoiles à haute température, qui devraient produire tout aussi bien une telle annihilation. Et il m'est impossible de concevoir une telle cause opérant *seulement* dans les régions froides de l'espace interstellaire ;

3° La plus forte objection qu'on puisse faire est que, d'après l'équation d'EINSTEIN, l'énergie libérée dans une annihilation de protons

n'aurait même pas l'ordre de grandeur convenable. Elle serait trente-cinq fois trop grande pour correspondre à la composante principale, qui est la moins pénétrante. Et si l'on ajoute à une simple annihilation de protons celle de tout un noyau, pour rendre compte de la structure de bandes, on arrive à des contradictions avec les faits d'observation.

Retournant alors à l'hypothèse qui nous reste, celle d'une reconstruction d'atomes, nous trouvons que l'appui qui lui vient de l'application de l'équation d'EINSTEIN est bien plus fort que la simple coïncidence déjà constatée entre l'énergie calculée par cette équation, et l'énergie obtenue par extrapolation de la courbe expérimentale des énergies en fonction des pouvoirs pénétrants, jusqu'à un pouvoir pénétrant cinq fois plus fort que ceux qui correspondent aux énergies directement observées. Il serait dangereux de tabler sur une telle extrapolation, s'il était possible de trouver d'autres transformations atomiques pouvant conduire à des énergies de l'ordre de grandeur convenable, à savoir environ 30 millions de volts. Mais cela n'est pas le cas. Il n'y a que trois sortes de transformations atomiques possibles, à savoir : 1° un processus de désintégration atomique ; 2° un processus de formation d'atomes et 3° un processus d'annihilation d'atomes.

Considérons la première hypothèse ; la considération de la courbe d'ASTON, maintenant célèbre, montre qu'aucun élément abondant ne peut se désintégrer avec libération d'énergie, puisque les éléments abondants, à part l'hydrogène et l'hélium, sont tous placés près du minimum de cette courbe. Seuls les éléments plus lourds que le fer peuvent libérer leur énergie par désintégration, et *ils sont tous si peu abondants, qu'ils n'entrent certainement pas en jeu lors de la formation des rayons cosmiques*. Même si l'un d'eux était assez abondant, il n'est aucune désintégration connue, ni même concevable, qui puisse libérer l'énergie que demande la production des rayons cosmiques : de sorte que, pour ces deux raisons, la désintégration atomique doit être définitivement écartée. Quant à l'annihilation d'atomes, l'équation d'EINSTEIN leur fait libérer, comme on l'a vu, *beaucoup trop* d'énergie pour qu'elle puisse rendre compte de la part la plus abondante des rayons cosmiques.

De l'autre côté, la troisième alternative, celle d'une reconstruction d'atomes, s'accorde de façon tout à fait satisfaisante avec les nécessités expérimentales et théoriques. En effet, s'il y a formation d'atomes dans l'Univers, étant donné que tous les atomes sont formés en fait d'hydro-

gène et d'hélium, et que l'hélium lui-même est formé de quatre atomes d'hydrogène, il devient évident que la formation d'atomes la plus fréquente devra être la formation d'hélium à partir d'hydrogène. Ceci correspond merveilleusement avec le fait que la bande des rayons cosmiques la moins pénétrante, qui paraît en fait correspondre à une énergie d'environ 30 millions de volts, transporte aussi quelques 80 % à 90 % de l'énergie totale des rayons cosmiques qui entrent dans l'atmosphère.

Maintenant, si l'on admet qu'il y ait réellement formation d'hélium à partir d'hydrogène, c'est-à-dire si l'on admet qu'il y ait formation d'atomes, il faudra chercher s'il existe d'autres formations d'atomes possibles. Mais il est facile d'indiquer quelles sont les seules autres formations d'atomes qui peuvent contribuer en grande partie, à la production des rayons cosmiques observés. Car, si l'on considère les éléments terrestres, ceux trouvés dans les météorites, ou observés à l'aide de la spectroscopie stellaire, on ne rencontre que trois éléments abondants, à part l'hélium et l'hydrogène, à savoir, ce que j'ai appelé le groupe de l'oxygène (C, N, O), le groupe du silicium (Mg, Al, Si, S) et le groupe du fer (Ca, Fe). Les trois éléments ci-dessus (en particulier l'oxygène) sont si abondants en comparaison des autres, qu'auprès des rayons qu'ils produisent, les rayons produits par la formation de tous les autres seraient presque négligeables.

Les principaux rayons observables provenant de la formation d'atomes seront donc, à part ceux de la grande bande due à la formation d'hélium une bande de l'oxygène d'une énergie de 116 millions de volts (calculée par l'équation d'EINSTEIN) une bande du silicium d'une énergie de 216 millions de volts, et une bande du fer de 459 millions de volts. Or, CAMERON et moi avons montré, comme je l'ai déjà dit, que notre courbe se compose de plusieurs bandes, qui sont approximativement ces trois bandes ; à part que le pouvoir pénétrant de ce qui serait la bande du fer, tant dans notre travail que dans les belles observations de REGENER (qui s'accordent avec les nôtres dans la limite des erreurs d'expérience), paraît être plus fort qu'on ne s'y attendait. En fait, nous n'avons aucune base certaine pour évaluer le pouvoir pénétrant de cette bande de haute énergie, pas plus d'ailleurs que pour évaluer celui des autres bandes : l'extrapolation de la courbe expérimentale reliant l'énergie et le pouvoir pénétrant est extrême dans tous les cas, et plus encore pour la bande de plus haute énergie.

SUR LES RAYONS COSMIQUES

Tout compte fait, donc, l'équation d'Einstein, si l'on suppose qu'elle puisse ici servir de guide, plaide très énergiquement en faveur de l'hypothèse de la formation d'atomes, du moins pour rendre compte de la formation de la plus grande partie des rayons cosmiques.

3. ÉTUDE DU PROCESSUS D'AGGLOMÉRATION EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE ET DE LA PRESSION. — Si l'on adopte la théorie précédente, il est nécessaire de supposer, comme nous l'avons déjà montré, que le processus de formation des atomes a lieu dans l'espace interstellaire. Or, cette supposition semble à son tour renforcer l'hypothèse initiale, car en quel autre point de l'Univers peut-on espérer qu'un tel processus soit possible ? Les considérations suivantes semblent indiquer que l'espace interstellaire doit être exclusivement envisagé.

Les relations d'énergie et d'entropie sont naturellement applicables, quoiqu'il arrive. La formation d'atomes à partir d'hydrogène, ou, une fois l'hélium formé à partir d'hydrogène et d'hélium, ne comporte la violation d'aucune loi thermodynamique, puisque ce processus correspond à un accroissement d'entropie, c'est-à-dire à la transformation d'une masse ou d'une énergie potentielle en énergie rayonnante. De plus, elle s'accorde avec la mécanique ondulatoire moderne, la théorie de GAMOW, qui pense que si une agglomération de 4 ou de 16 atomes d'hydrogène peut avoir lieu et subsister pendant un temps suffisant, un saut d'énergie potentielle aura lieu tôt ou tard, après quoi le groupe d'atomes d'hydrogène se retrouvera finalement dans le noyau.

Mais où peut se former, et durer, une telle agglomération d'atomes ? Évidemment pas dans les étoiles où les températures et les pressions sont fortes, car l'énergie et la fréquence des collisions tendront à les détruire. D'après toutes nos expériences, tout processus agglomératif est favorisé par une diminution, et non par une élévation de la température. L'agglomération d'atomes d'hydrogène ou d'hélium ne peut donc avoir lieu qu'aux températures extrêmement basses, c'est-à-dire au-dessous de la température de condensation correspondant à la pression existant dans ces gaz.

Dans l'espace interstellaire, où l'on estime la température à moins de 1° absolu une telle agglomération peut avoir lieu : car que serait la liquéfaction, sinon la formation, sous l'influence des forces moléculaires ordinaires, de tels agrégats moléculaires, quand la température est assez basse ? Cela ne requiert naturellement pas une collision

simultanée de plusieurs corpuscules. Quelqu'un pourrait-il supposer que les quelques milliards de molécules d'eau condensés en une gouttelette sur un ion du nuage de la chambre de WILSON sont réunis par le choc simultané de millions de corpuscules ? Naturellement non. Deux molécules se collent l'une à l'autre, puis une troisième, etc. Et remarquons bien que les forces ioniques opérant dans la formation des gouttelettes qui constituent la trace d'un rayon β sont capables, aussi bien que les forces moléculaires ordinaires, de former les agrégats d'hydrogène et d'hélium nécessaires pour la formation d'un atome. La population atomique de l'espace interstellaire (estimée à un atome pour 15 cm^3 environ) semble adéquate pour permettre à un ion d'agir comme dans la chambre de WILSON. Le temps nécessaire à la formation pourra être pris aussi long qu'il le faut. Notons encore que la chambre d'expérience est ici l'Univers, et que la fréquence d'une formation d'atome par kilomètre cube n'a pas besoin d'être grande pour rendre compte des rayons observés. *En un mot, les basses températures de l'espace interstellaire sont nécessaires à la formation des agrégats atomiques, et les basses pressions sont nécessaires pour leur permettre de persister assez longtemps pour qu'ait lieu le saut de potentiel dont il a été question.*

Par contre, si l'on peut supposer qu'une destruction d'atomes a lieu dans les étoiles, comme on l'a fait jusqu'ici pour rendre compte de leur durée d'existence, la formation d'atomes dans ce milieu me semble une hypothèse à rejeter absolument.

4. LES MESURES DIRECTES DE L'ÉNERGIE DES RAYONS COSMIQUES FAITES PAR CARL D. ANDERSON. — Le quatrième fait important concernant les rayons cosmiques vient tout récemment d'être mis en évidence par le D^r CARL D. ANDERSON dans le laboratoire Norman Bridge, de l'Institut de Californie. Il y a environ deux ans je suggérai au D^r ANDERSON que le prochain grand pas dans notre connaissance des rayons cosmiques viendrait d'une mesure directe, par la méthode de la chambre de WILSON, de l'énergie des rayons corpusculaires émis par les photons incidents. Ceci demandait un champ magnétique assez fort pour produire une courbure mesurable de la trajectoire d'une particule chargée se déplaçant avec des énergies pouvant aller jusqu'à 1.000 millions de volts. Nous décidâmes de faire fabriquer dans nos ateliers un tel appareil qui emploierait des courants magnétisants de 2.000 A, avec,

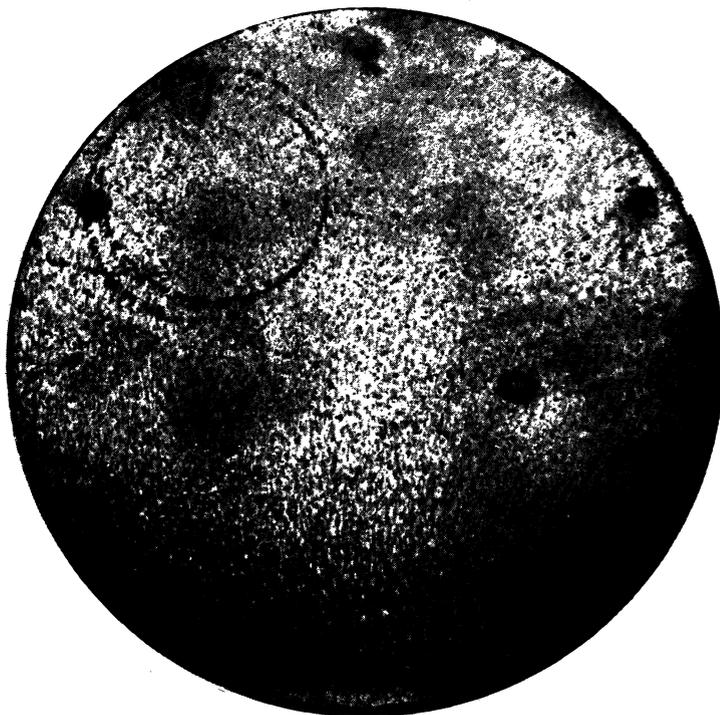


FIG. 1. — Electron négatif de 7×10^6 eV, produit vraisemblablement par effet Compton d'un rayon cosmique sur un électron extra-nucléaire.



FIG. 2. — A gauche, un électron de 120×10^6 eV et à droite, un proton d'énergie 130×10^6 eV produits par la désintégration d'un seul et même noyau.

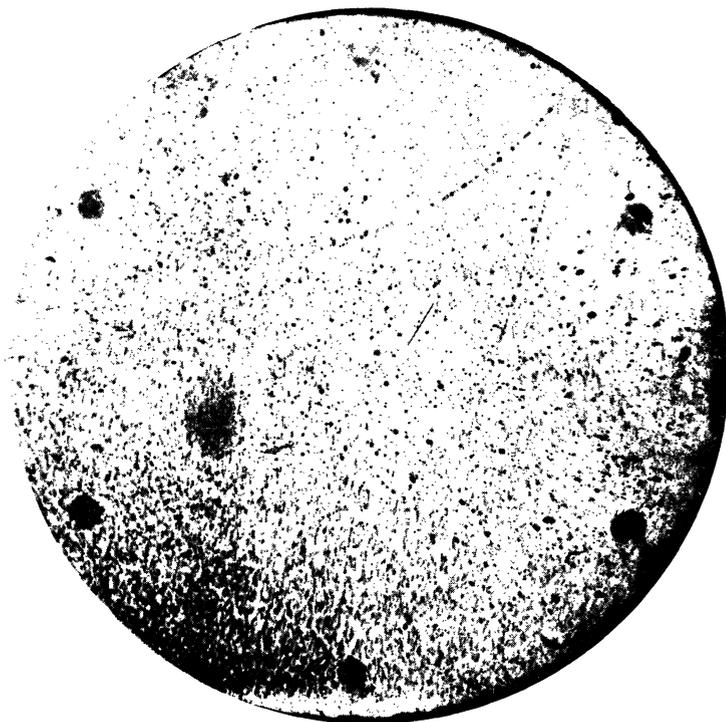


FIG. 3. — A gauche, une particule négative d'énergie 27×10^6 eV et à droite, une particule positive d'énergie 450×10^6 eV, provenant du même noyau.

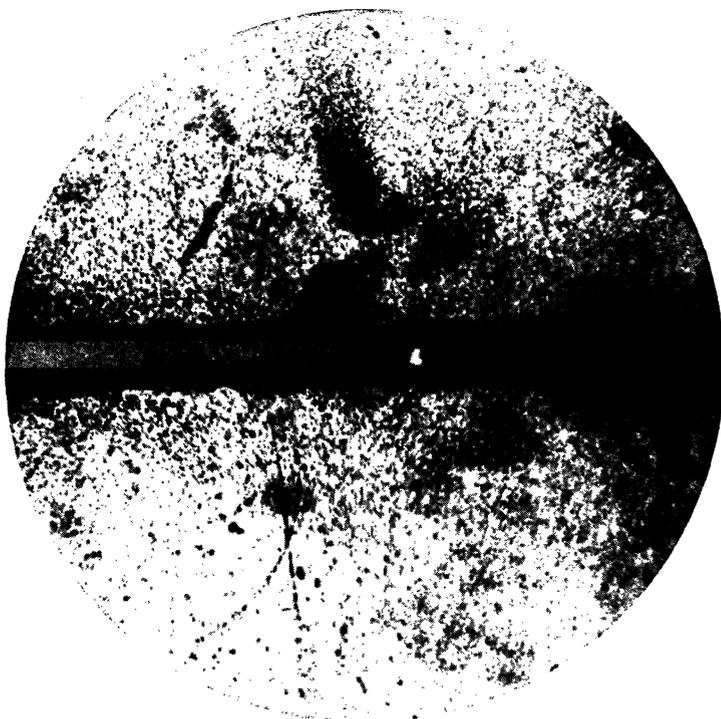


FIG. 4. — Dans cette expérience on avait placé à travers la chambre de Wilson une plaque de plomb de 1 cm. d'épaisseur. Un rayon cosmique a arraché simultanément à un noyau d'un atome de plomb une particule négative d'énergie 11×10^6 eV et une particule positive d'énergie 100×10^6 eV.

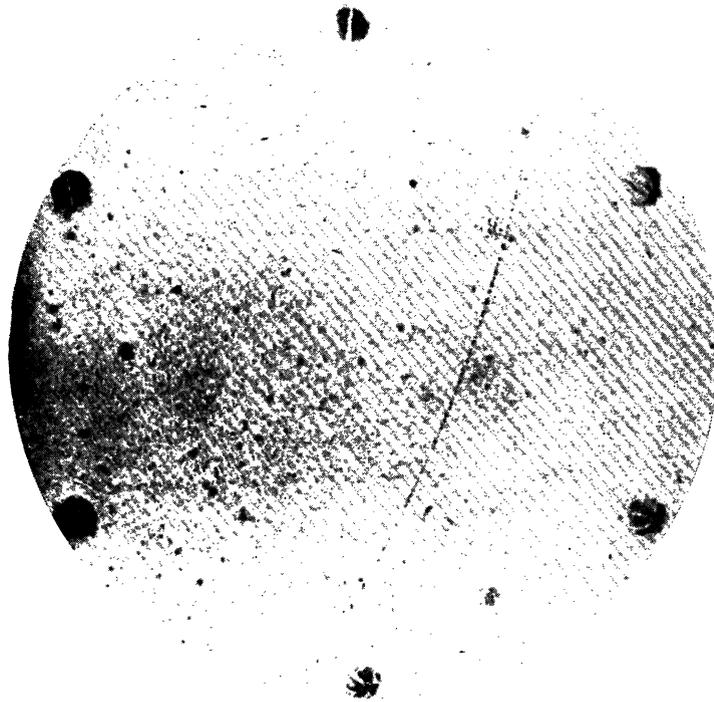


FIG. 5. — Electron d'énergie 110×10^6 eV.

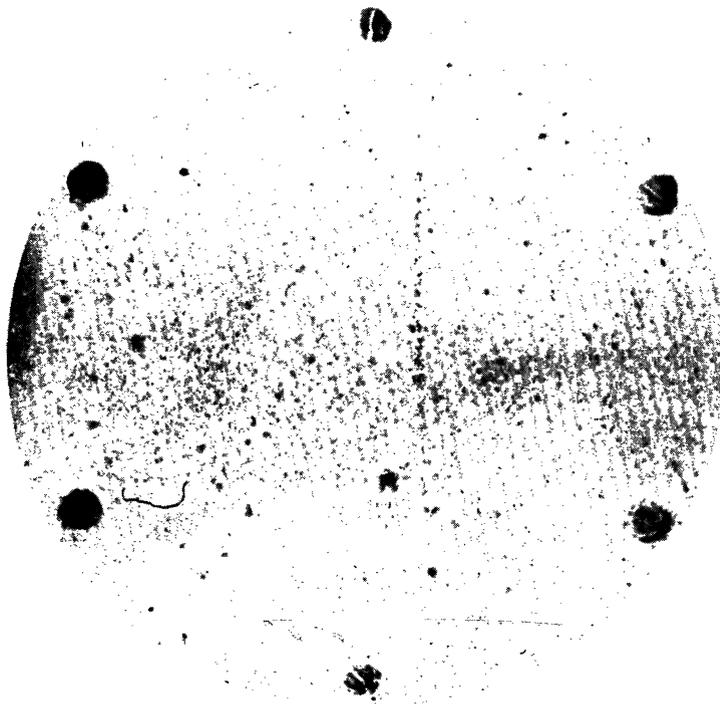


FIG. 6. — Proton d'énergie 50×10^6 eV.

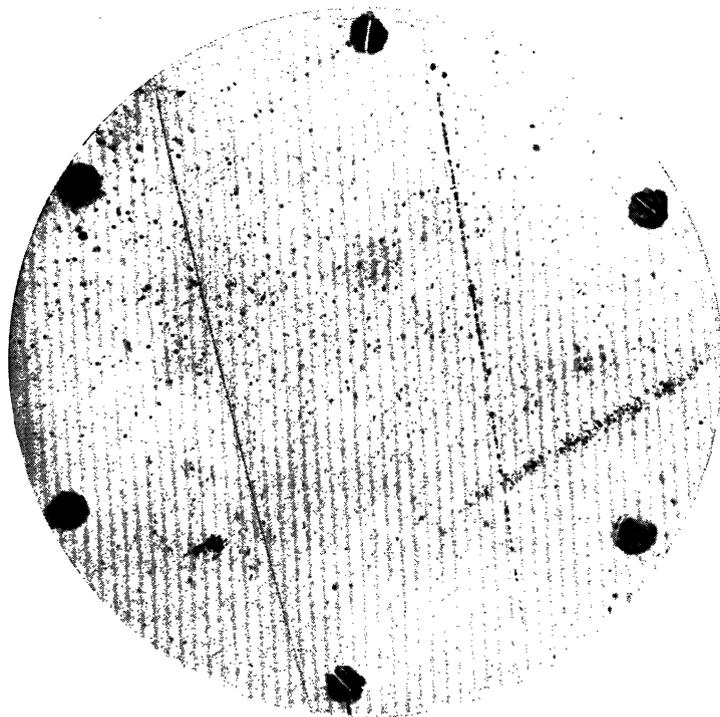


FIG. 7. — Particule négative d'énergie $1,28 \times 10^9$ eV.

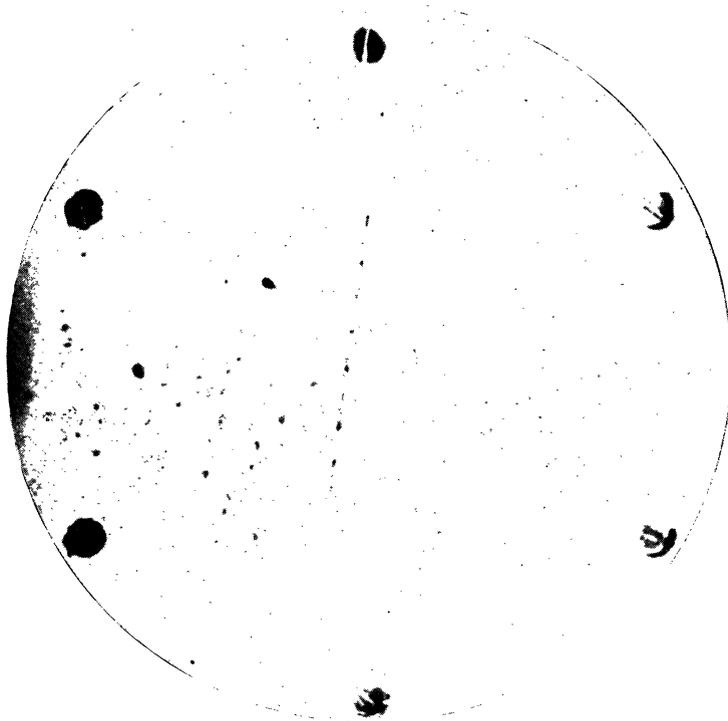


FIG. 8. — Particule positive d'énergie 2×10^9 eV.

de plus, un noyau de fer. L'appareil pourrait ainsi photographier des trajectoires de 15 centimètres de longueur dont la courbure serait mesurée dans un champ de 20.000 gauss. Les courbures des trajectoires de 1 milliard de volts sont alors tout juste mesurables. Le D^r ANDERSON a récemment obtenu, avec cet appareil les premières mesures directes de l'énergie de ces rayons corpusculaires. Ces expériences ne sont que préliminaires. Le D^r ANDERSON n'a pu trouver, sur 1.100 clichés, que 34 tracés mesurables. Ces photographies mettent en évidence un certain nombre de fait importants et nouveaux.

1^o Les rayons cosmiques incidents sont absorbés surtout par les noyaux atomiques ⁽¹⁾, et non par les électrons extra-nucléaires, comme on le supposait généralement. En effet, la courbure des tracés produits par un champ magnétique de 17.000 gauss, correspond plus fréquemment à des particules positives qu'à des particules négatives. Les particules positives ne peuvent venir que du noyau. La longueur des trajectoires qui ont pu fournir des mesures était ici de 15 centimètres dans des champs magnétiques qui vont jusqu'à 20.000 gauss ;

2^o Dans 17 % des rencontres observées entre rayons cosmiques et noyaux, ceux-ci étaient partiellement détruits : des particules positives et négatives s'en échappent. Bien que la plaque photographique ne fixe le plus souvent que l'une des deux ou plus des trajectoires associées, il y a sans doute un plus grand pourcentage de rencontres de cette sorte. AUGER et SKOBELZYN ⁽²⁾ avaient déjà observé des doubles trajectoires de rayons cosmiques, mais ils n'avaient pas pu différencier les trajectoires positives des trajectoires négatives, ni mesurer leur énergie. Les observations 1 et 2 montrent que des formules telles que celles de KLEIN-NISHINA, qui ne tiennent compte que de l'absorption par les électrons libres (négatifs ou positifs) n'ont aucune validité dans le cas des rayons cosmiques ;

3^o Les rayons cosmiques agissent comme des photons dans deux cas importants :

Premièrement, ils semblent occasionnellement rencontrer des électrons et donner lieu à l'effet COMPTON : ces électrons montrent dans un

⁽¹⁾ Une des meilleures photographies, montrant une trajectoire négative de 140 millions de volts et une trajectoire positive associées de 70 millions de volts a été publiée le 18 décembre 1931 dans le *Science Service, Washington*, sous le titre *Cosmic Rays Disrupt Atomic Hearts*.

⁽²⁾ AUGER et SKOBELZYN, *Comptes rendus*, t. CLXXXIX, 1929, p. 55. Voir aussi SKOBELZYN, *Zeitschr. für Phys.*, t. LIV, 1929, p. 686.

champ de 17.000 gauss des trajectoires circulaires analogues à celles produites dans des expériences de contrôle faites avec des rayons γ , à cela près que les électrons dus aux rayons cosmiques présentent des courbures plus petites, correspondant à des énergies d'environ 20 millions de volts.

Deuxièmement, le fait que les rayons incidents donnent lieu à plus de trajectoires venant du noyau que de rencontres extra-nucléaires est une propriété spéciale aux photons. Il est bien connu, en effet, que les photons des rayons X et des rayons γ sont toujours plus absorbés par ceux des constituants des atomes dont l'énergie de liaison se rapproche le plus de celle du photon incident (à condition seulement que l'énergie de ce dernier dépasse l'énergie de liaison). Il semble que ces deux propriétés devraient appartenir également aux neutrons, imaginés récemment par CHADWICK ⁽¹⁾ pour expliquer certains effets observés avec les rayons très pénétrants produits par le choc de rayons α sur le glucinium. Cependant cette hypothèse est non seulement une supposition *ad hoc*, mais encore bien invraisemblable. Il ne semble d'ailleurs point que l'hypothèse du neutron soit nécessaire pour interpréter les effets des rayons cosmiques.

4° Sur environ 1.000 clichés, 34 présentent des trajectoires mesurables. Sur ces 34 trajectoires, 6, soit 17 %, présentent, comme on l'a dit plus haut, des trajectoires associées, dans lesquelles deux particules au moins (et sur ces deux particules une particule positive dans quatre cas sur six) sont sorties du noyau. L'énergie libérée, en supposant que les particules positives soient des protons et les particules négatives des électrons (hypothèse la plus raisonnable) est dans quatre cas d'environ 200 millions de volts, dans l'un de 21 millions de volts seulement, et dans le dernier des six cas, d'environ 500 millions de volts

Sur les 34 trajectoires, 11 sont des trajectoires d'un proton positif unique, 4 d'environ 150 millions de volts, 3 d'environ 100 millions de volts, 2 de 250 millions de volts et 2 de 350 millions de volts.

On trouve également deux trajectoires d'électrons négatifs seuls, de 350 millions de volts, et trois protons seuls, d'une énergie de 16 à 40 millions de volts seulement.

On trouve enfin, cinq belles trajectoires circulaires d'électrons seuls, qui semblent provenir de rencontres de COMPTON avec des électrons

(1) CHADWICK, *Nature*, t. CXXIX, 27 février 1932, p. 312.

SUR LES RAYONS COSMIQUES

extranucléaires, d'une énergie de 7 à 18 millions de volts ; trois traces de protons seuls, une trace d'électron seul, d'une énergie de 500 millions de volts, finalement trois positives et peut-être une négative (le signe en est douteux) qui semblent révéler des énergies de l'ordre de 1.000 millions de volts.

En un mot, en supposant que les trajectoires soient dues dans chacun de ces cas, soit à des protons, soit à des électrons, *neuf sur dix des trajectoires observées conduisent à des énergies qui sont de l'ordre de celles qu'on avait calculées, à l'aide de l'équation d'Einstein, dans l'hypothèse d'une reconstruction d'atomes* (1).

Les rayons provenant de la formation de l'hélium, qui possèdent une énergie de 27 millions de volts, doivent être tous absorbés avant d'atteindre le niveau de la mer de sorte que les photons qui atteignent les appareils doivent être : a) des photons dûs à la formation de l'oxygène, dont l'énergie, calculée par l'équation d'EINSTEIN, est de 116 millions de volts ; b) des photons dûs à la formation de silicium, de 116 millions de volts et c) des photons dûs à la formation du fer, d'une énergie de 500 millions de volts.

Un dixième des trajectoires semblent posséder toutefois des énergies trop fortes pour être expliquées par les hypothèses précédentes. Un fait cependant semble témoigner contre l'existence de ces énergies excessivement grandes : c'est que la plupart de ces trajectoires presque rectilignes (c'est-à-dire de haute énergie), si ce n'est toutes, présentent de très petits changements brusques de direction, tels qu'en présentent toujours les rayons α et β du radium, mais que l'on ne s'attendrait pas à trouver avec les énormes énergies que décèlent les courbures observées. Il est cependant possible que ces courbes aient été modifiées par des rencontres et ne correspondent pas en réalité à des énergies aussi fortes. De toutes façons, l'abondance de ces changements brusques de direction parle en faveur d'une énergie plus faible que celle que l'on déduirait de la courbure apparente générale. Une étude plus poussée de ces changements brusques de direction est nécessaire avant qu'on puisse formuler une conclusion définitive.

Toutefois, *le fait d'une désintégration du noyau*, montré pour la première fois et d'une façon indiscutable par l'aspect des charges positives

(1) Ce fait semble rendre nécessaire la recherche d'une explication des expériences récentes de BOTHE et KOLHÖRSTHR, MOTT-SMITH et LOCKER, et de ROSSI, autre que celle déjà donnée.

(qui, compte tenu de l'intensité d'ionisation observée, ne proviennent pas de la totalité du noyau) — indique qu'il est en général illégitime de traiter une rencontre entre photons et noyau comme une simple rencontre de COMPTON entre un photon, et un électron ou un proton du noyau. La forte énergie des négatives élimine aussi — étant donné la valeur des masses en jeu — la possibilité que celles-ci aient acquis leur énergie dans des rencontres avec des protons de grande énergie. Puisque toute l'énergie d'un photon incident peut être absorbée dans le noyau qui est désintégré, sans qu'il y ait violation ni de la conservation du moment ni de la conservation de l'énergie, l'hypothèse du photon ne rencontre aucune difficulté dans l'explication des énergies observées. Car, pratiquement, tout ou partie de l'énergie d'un photon incident doit être capable d'apparaître dans une seule éjection de protons ou d'électrons, ou dans un certain nombre de celles-ci.

Quelques-uns des électrons seuls de haute énergie peuvent toutefois représenter de simples rencontres de COMPTON de photons de forte énergie avec des électrons libres. En effet, un photon de forte énergie doit être capable, même dans une rencontre de COMPTON, de transporter une grande partie de son énergie sur un électron libre; tandis qu'un neutron d'une masse analogue à celle d'un proton ne peut transférer plus des 5 centièmes de son énergie à un électron libre. De sorte que l'hypothèse du photon présente plus de souplesse pour rendre compte des fortes énergies observées sur les protons et les électrons que n'en présente l'hypothèse du neutron. Cette dernière nous semble tout à fait impuissante en face des énergies observées sur les rayons cosmiques, puisqu'un neutron d'une énergie de 10 volts au moins ne pourrait transmettre à un électron libre une énergie de plus de 3 millions de volts, et que les énergies observées dans ce qui nous semble être des rencontres de COMPTON sont presque toutes de 7 à 20 millions de volts. Seule l'hypothèse du photon semble s'accorder avec ces faits.