ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES

153

EXPOSÉS DE PHYSIQUE ATOMIQUE EXPERIMENTALE

PUBLIÈS SOUS LA DIRECTION DE

M. MAURICE DE BROGLIE
Membre de l'Institut

III

RAYONS COSMIQUES

ASPECT DES PHÉNOMÈNES ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

PAR

LOUIS LEPRINCE-RINGUET

Préface de
M. Maurice de Broglie

PARIS

HERMANN & C^IE, ÉDITEURS
6, Rue de la Sorbonne, 6

1934

Préface

La Physique s'est enrichie depuis quelques années d'un nouveau chapitre qui nous réserve, à coup sûr, bien des étonnements ; c'est celui des rayons cosmiques. Considérés tout d'abord comme une façon de désigner un petit résidu d'ionisation que les autres causes ne permettaient pas d'expliquer, ces rayons, grâce à des artifices très ingénieux, peuvent être aujourd'hui étudiés en détail et apportent à la Physique du noyau des atomes, comme à celle des rayonnements de très grande énergie, un puissant moyen d'investigation.

Alors que les rayons x, et y des corps radioactifs n'atteignent pas dix millions d'électron-volts, c'est, en effet, par centaines de millions et même par milliards d'électron-volts qu'il faut chiffrer l'énergie individuelle des radiations cosmiques. II faut donc s'attendre à trouver dans ce domaine des phénomènes d'un caractère tout à fait spécial.

Au point de vue objectif, ce qui a déjà été constaté dans les conditions ordinaires, c'est la présence de trajectoires rectilignes ionisantes, révélant le passage de corpuscules chargés électriquement et d'une extraordinaire pénétration. En même temps, et surtout au voisinage de masses importantes de divers corps, on assiste à l'apparition de gerbes de trajectoires et à la production d'autres phénomènes singuliers. Des neutrons, des électrons positifs, des projections d'atomes lourds ont également déjà été signalés.

*

* *

Tout ceci se passe n'importe où et n'importe quand, à peu près avec la même intensité ; nous sommes donc soumis en tout temps et en tous lieux à un bombardement continu que nous ne soupçonnions pas ; les « arrivées » se succèdent à la cadence d'environ une par minute et par centimètre carré de surface horizontale et l'énergie ainsi recueillie est loin d'être négligeable.

Deux grandes questions se posent surtout : d'une part, quels sont les effets de ce bombardement sur la matière qu'il rencontre, et d'autre part, quelle est la nature et quelle est l'origine (le ces mystérieux projectiles ; la

première concerne la physique du noyau et les expériences de laboratoire, la seconde nous transporte dans le domaine de la physique du globe et des phénomènes cosmiques, elle exigera des moyens d'étude tout différents.

L'une et l'autre ne sont qu'abordées à l'heure présente et ce sont les premiers résultats de cette enquête que M. Louis Leprince-Ringuet expose dans les pages qui suivent, avec une clarté et une richesse de vues que les lecteurs de cette brochure ne manqueront pas d'apprécier ; l'auteur se trouve, du reste, par plusieurs années de travaux de laboratoire et par un voyage d'études qui l'a conduit de l'hémisphère nord à l'hémisphère sud, particulièrement bien placé pour connaître et pour exposer les diverses faces d'un sujet aussi complexe.

Toutes ces nouvelles découvertes concourent à l'extension considérable et inattendue prise tout récemment par la radioactivité et la physique nucléaire. Avec les transmutations artificielles, les neutrons et les électrons positifs, c'est un renouvellement complet qui vient de se produire et qui éclairera certainement d'un jour nouveau les relations encore si mystérieuses entre la matière et la lumière.

Un des spécialistes les plus compétents pour tout ce qui regarde l'étude expérimentale des rayons cosmiques, et le premier physicien peut-être qui ait donné un aspect clair à l'écheveau embrouillé de ces phénomènes, M. Bruno Rossi, professeur de physique à l'Université de Padoue, a bien voulu promettre de rédiger prochainement un second fascicule sur les problèmes les plus importants qui se posent à propos de ce nouveau rayonnement.
Maurice de Broglie.

Introduction

Le problème du rayonnement ultrapénétrant, dit « cosmique est traité au cours des pages qui suivent dans le même esprit que le problème des transmutations artificielles le fut dans un exposé récent de cette collection. Il s'agit seulement pour nous de suivre l'évolution continue d'une question qui prend chaque mois une importance plus considérable et occupe l'activité (l'un nombre toujours croissant de physiciens et nous désirons remercier très vivement dès l'abord M. M. de Broglie d'avoir bien voulu nous former à l'étude de ces problèmes et de nous permettre de les exposer ici.

L'abondance des recherches (500 publications depuis 1924) a jeté déjà beaucoup de lumière mais aussi beaucoup de confusion, parce que, si

l'expérience même était faite en général avec un grand soin et une précision digne d'admiration, elle était souvent préparée avec des vues trop étroites, et les résultats interprétés sans un esprit critique suffisamment ouvert.

Le contraire eut d'ailleurs été bien difficile, puisque aucune, ou presque, des données expérimentales acquises jusqu'alors ne pouvait valoir dans un domaine où les énergies sont à multiplier par plusieurs milliers et où la nature même (les phénomènes est fort différente de ce qui était connu. Lorsqu'on passe des énergies de la radioactivité (1) à celles qui sont mises en jeu par les phénomènes individuels du rayonnement ultrapénétrant, on ne sait pas, au début tout au moins, que le saut est aussi grand, puis on ignore tout des propriétés accompagnant la nouvelle radiation ; aussi l'extrapolation de résultats connus, qui est peut-être le guide le plus indiqué, présente à coup sûr de sérieux dangers pour la compréhension des nouveaux phénomènes. Plusieurs exemples, au cours de l'exposé, illustreront cette considération.

(') Quelques millions d'électron-volts. L'électron-volt (énergie acquise par un électron accéléré sous une différence (le potentiel de 1 volt) vaut 1,6 x 10-12 ergs.

Définition des rayonnements ultrapénétranls

Une remarque préliminaire doit être faite sur la définition même des rayonnements ultrapénétrants. En général, on pense surtout à la propriété découverte par Hess [1], d'une radiation très pénétrante dont l'effet d'ionisation augmente vite lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère.

Mais en réalité, ce que l'on observe expérimentalement, ce sont tous les rayonnements qui s'étendent, dans le domaine des énergies, au delà de quelques millions d'électron-volts, et, dans celui des pouvoirs de pénétration, au delà de quelques centimètres de plomb, limite acquise aux rayons des corps radioactifs (1).

Il est vraisemblable qu'une cause unique n'est pas à l'origine de tous les rayonnements ainsi définis. Mais on peut dire que le principal effet, qui est au moins 200 fois plus intense dans la partie supérieure de l'atmosphère qu'au niveau du sol, doit provenir d'une seule cause ou d'un petit nombre de causes.

Il y a sans aucun doute, parmi ces rayonnements, une partie très importante dont la source est extra-terrestre et peut-être même plus lointaine que la limite du système solaire. C'est la raison de l'appellation de « cosmique fréquemment employée.

Enfin, nous dirons aussi que, parmi les phénomènes très pénétrants qui peuvent exister naturellement, ceux qui se manifestent d'abord à l'expérience sont ou les plus intenses, ou les plus faciles à détecter. Par exemple, dans une chambre d'ionisation, ce sont les rayons les plus absorbables qui donnent en général l'effet le plus considérable, et, clans l'effet global que produit clans une telle chambre un rayonnement varié, la portion pénétrante n'a qu'une faible part : comme les radiations secondaires accompagnant une radiation primaire sont moins pénétrantes, ce sont elles qui se manifesteront surtout ; l'incertitude sur les rapports entre les deux rayonnements rend souvent difficile et aléatoire l'interprétation des résultats.

(1)Il s'agit des rayonnements naturels : Les neutrons, par exemple, donnent des effets d'ionisation après filtration par plusieurs dizaines de cm de plomb ; ils n'entrent pas dans le cadre des rayonnements cosmiques car ils sont produits artificiellement. Cela n'empêche pas d'envisager l'existence possible de neutrons dans la radiation ultrapénétrante.

PREMIÈRE PARTIE

Résultats acquis avant 1930

L'étude du rayonnement cosmique a fait de lents progrès pendant plus de vingt ans. Pourtant, en 1914, soit dix ans après les toutes premières expériences [2 à 5], on connaissait déjà avec certitude deux données importantes : l'existence, tout d'abord, d'un rayonnement très pénétrant produisant à la surface du sol dans une chambre d'ionisation un petit nombre de paires d'ions, (le l'ordre d'une à deux par ce de gaz et par seconde, puis le fait que l'intensité d'ionisation augmente vite avec l'altitude, lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère [1, 2] (1).

Les années suivantes, jusque vers 1930, ont vu jaillir un très grand nombre d'études relatives à l'absorption, la direction, la périodicité possible (lu nouveau rayonnement. On peut dire qu'à cette époque les résultats des expériences nombreuses effectuées en des lieux très divers pouvaient se résumer ainsi :

1° Il existe un rayonnement très pénétrant, dont l'intensité augmente rapidement lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère, et décroît rapidement lorsqu'on s'enfonce au-dessous de la surface de la terre, dans les lacs par exemple [6, 7] ;

2° La courbe d'absorption de ce rayonnement (ionisation en fonction de l'altitude ou de la profondeur) ressemble à une courbe exponentielle, ou plutôt à la superposition des courbes d'absorption exponentielles de quelques fréquences de rayons gamma ;

3° Pas ou peu de variation en fonction de la latitude du lieu d'observation ;

4° Indépendance à peu près complète de la position du soleil, des étoiles, de la voie lactée, de la longitude terrestre.

A vrai dire toutes les expériences n'étaient pas concordantes, mais les variations ou les périodicités trouvées par quelques auteurs étaient de petite amplitude et contredites par celles d'autres observateurs.

(') Le nombre de particules du rayonnement cosmique est de 1 par cm^2 de surface horizontale et par minute au niveau de la mer. L'énergie totale reçue par la terre sous forme derayonnement cosmique est de 3,5 X IO^{-3} ergs par cm^2 et par seconde, du même ordre que l'énergie reçue sous forme de lumière stellaire.

Ces résultats forment la base de la théorie de Millikan, théorie que ce physicien a exposée à plusieurs reprises, notamment à Paris, à l'Institut Henri Poincaré au cours de l'hiver 1931-1932 et au congrès international d'électricité en juillet 1932 [78J. Nous pensons bon, pour la clarté de l'exposé, de la prendre comme point de départ de cette étude.

Théorie de Millikan (1931-1932)

En voici les principaux points :

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 : en d'autres termes et en première approximation ils nous viennent de la voûte céleste avec une distribution uniforme. On en conclut que leur origine doit être cherchée dans l'espace interstellaire ;

2° L'intensité du rayonnement étant (avec une incertitude de 5 % au maximum) la même pour une même hauteur barométrique, quelle que soit la latitude du lieu d'observation, on peut dire que le rayonnement incident n'est pas constitué d'électrons ou de protons, qui, chargés électriquement, seraient déviés par le champ magnétique terrestre avant leur arrivée près de la terre. On montre en effet qu'un électron de deux milliards d'électron-volts ne peut frapper la surface de la terre à plus de 40° du pôle magnétique (Störmer). L'hypothèse la plus plausible alors est que le rayonnement incident doit être formé de photons d'un très grand quantum ; l'expérience conduit même à penser que ces photons, quand ils pénètrent dans le champ terrestre, ne sont pas encore accompagnés d'une quantité appréciable d'électrons ou de corpuscules secondaires rapides, résultant par exemple de leur passage à travers un milieu matériel avant d'arriver dans notre atmosphère. Cette dernière conclusion appuie encore l'hypothèse d'une origine interstellaire de la radiation.

D'ailleurs l'étude de la courbe d'absorption du rayonnement cosmique en fonction de la quantité de matière traversée permet d'attribuer à ce rayonnement une structure de bandes. On trouve que cette courbe peut être considérée comme résultant de la superposition des courbes d'absorption exponentielle relatives à 4 bandes de fréquences. Les énergies correspondantes, si on extrapole la formule reliant le pouvoir pénétrant à la fréquence des rayons des corps radioactifs, sont environ 25, 100, 200 et 500 millions d'électron-volts. Or ces énergies sont à rapprocher des valeurs que l'on obtient en imaginant la formation des atomes à partir de leurs constituants élémentaires possibles : la libération d'énergie qui doit

accompagner la formation d'un atome d'Hélium à partir de 4 atomes d'hydrogène est de 27' millions d'électron-volts (').

Une correspondance analogue donne 116, 216, 450 millions d'électron-volts pour les énergies qui seraient libérées par une formation semblable d'atomes d'Oxygène, de Silicium, de Fer. Or, ces trois éléments sont, avec l'Hydrogène et l'Hélium, de beaucoup les plus abondants dans la nature. Ainsi, le rapprochement de ces énergies et des indications fournies par les courbes d'ionisation laisse penser que le processus de formation d'atomes à partir d'éléments simples serait le mode de production de la plus grande partie au moins des rayons cosmiques. D'autres considérations militent d'ailleurs aussi en faveur de cette hypothèse.

Voilà les principaux points de la théorie de Millikan relative à la nature et au mode de production des rayonnements cosmiques. Il n'est que peu question des propriétés du rayonnement, notamment de son interaction avec la matière, la difficulté d'arrêter une radiation aussi pénétrante ne permettant guère d'avoir des indications précises sur ce sujet.

Pourtant de très belles photographies obtenues par Anderson [9] à la chambre de Wilson avaient déjà montré, au début de 1932, l'existence, parmi les produits secondaires, de particules chargées positivement et douées de grandes vitesses. Il apparaissait ainsi déjà que des phénomènes de dislocation nucléaire devaient probablement jouer un rôle important dans l'interaction du rayonnement avec la matière.

(') On calcule celle valeur en faisant correspondre à la faible différence de masse existant entre He et 4 H une énergie d'association des éléments constituant le noyau complexe ; le noyau d'hélium serait formé à partir de 4 protons et 2 électrons qui se combineraient en libérant de l'énergie (stabilité de He), donc en perdant de la masse. On utilise la formule d'Einstein W (énergie) = M (masse) x c^2, (c étant la vitesse de la lumière) dans laquelle à toute masse correspond une énergie.

Récentes modifications :

La théorie dont nous avons résumé les conclusions (ou les théories voisines, celle de Jeans par exemple) [8] semblait expliquer assez bien les résultats expérimentaux acquis, et, malgré son caractère incertain, pouvait paraître satisfaisante. Mais, au cours de 1932 et 1933, plusieurs groupes de faits nouveaux sont intervenus qui ne confirment pas toutes ces hypothèses.

Tout d'abord les bases expérimentales se sont montrées moins solides qu'on ne le supposait : plusieurs physiciens reprenant avec méthode les

expériences antérieures, ont en effet trouvé des variations notables de l'intensité du rayonnement avec la latitude ; d'autres ont infirmé l'existence d'un maximum d'ionisation quand on s'élève dans l'atmosphère. Puis, en étudiant les phénomènes cosmiques pris individuellement, on a mis en évidence la présence de corpuscules d'énergie très supérieure au milliard d'électron-volts, c'est-à-dire supérieure aux énergies de constitution des noyaux atomiques à partir (le protons élémentaires (). Aussi, actuellement, bien que les théories du genre de celle (le Millikan aient encore des défenseurs de grands poids (Regener), un autre courant d'explication s'est formé (Bothe et Kolhôster, Rossi, A. II. Compton, Dauvillier, Clay, etc...) cherchant l'interprétation des résultats dans une théorie corpusculaire (lu rayonnement cosmique, théorie fondamentalement opposée à l'ancienne, puisqu'elle n'exigerait plus l'isotropie du rayonnement dans l'espace, ni l'intervention des régions interstellaires dans la production de ces rayons.

A vrai dire, si la question parait embrouillée et susceptible d'interprétations opposées, si les expériences sont souvent contradictoires, la principale faute en est à certaine méthode de mesure, en apparence simple, mais dont 'es indications ne sont pas faciles à interpréter. Aussi, pour acquérir des idées claires, faut-il jeter un coup d'oeil rapide sur cette méthode et sur celles, plus délicates en apparence, mais plus fécondes, que l'on a mises au point récemment.

(') La théorie de Jeans se préoccupe surtout des composantes très dures du rayonnement, puisqu'elle fait intervenir l'annihilation des masses des noyaux d'atomes (plus d'un milliard d'électrons-volts). Pour le reste elle se rapproche de celle de Millikan.

Méthode de la chambre d'ionisation

1) Elle fui employée à peu près exclusivement jusqu'en 1929 : En général, pour augmenter l'effet d'ionisation dû au rayonnement cosmique (), on remplissait la chambre de gaz sous pression. Le conducteur chargé, collecteur d'ions réuni à l'électromètre, le déchargeait alors plus vite et l'appareil était plus sensible (fig. 1). En transportant un dispositif de ce genre à différentes altitudes, on trouve une courbe qui présente l'aspect de la figure 2. Voici alors le genre de déductions auxquelles conduit son examen : On cherche à distinguer dans cette courbe plusieurs exponentielles simples, afin de pouvoir définir plusieurs courbes d'absorption élémentaires correspondant chacune à un rayonnement monochromatique de photons et dont la courbe réelle serait la somme.

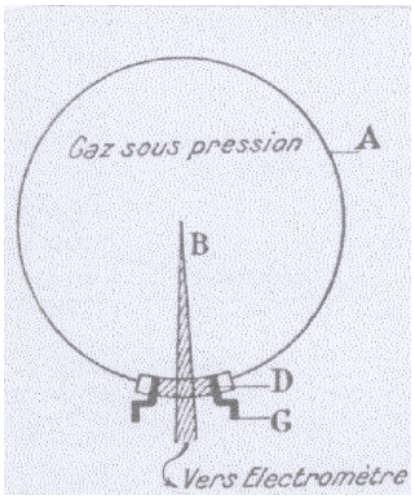


FIG. 1. — Schéma d'une chambre d'ionisation. A est la paroi métallique de la chambre, D un bouchon isolant, G un anneau de garde. L'électrode B collecte les ions formés dans la chambre et décharge l'électromètre auquel elle est reliée.

(') Cet effet. 1 à 2 paires d'ions par sec et par cc d'air au niveau de la mer, est très faible : une particule α du Polonium produit plus de 100.000 paires d'ions sur son parcours de 3.7 cm dans l'air.

Ayant ainsi déterminé les coefficients d'absorption des bandes composantes, on passe de là aux valeurs des énergies ou des fréquences correspondantes, en utilisant une des formules valables pour les rayons Gamma des corps radioactifs [11], celle de Klein-Nishina [10] par exemple (formule dans laquelle l'atome diffusant intervient par le nombre de ses électrons).

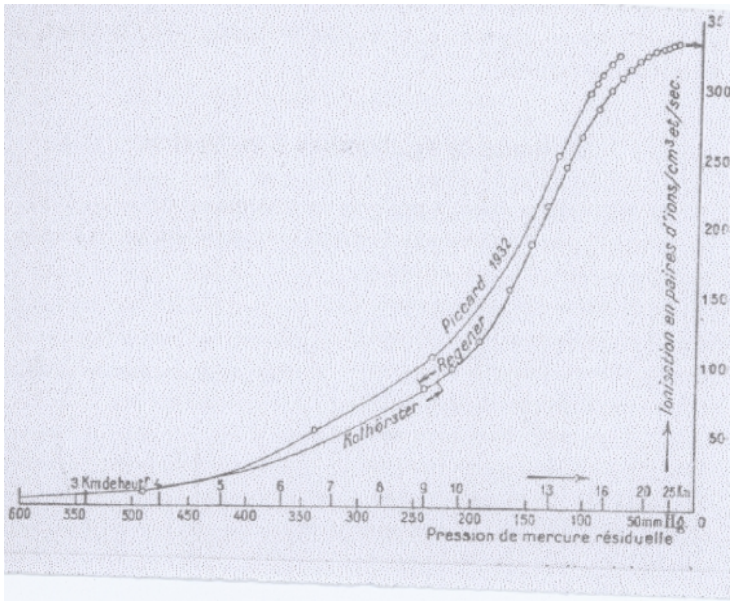


Figure 2

Intensité d'ionisation du rayonnement ultrapénétrant lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère jusqu'à 22 m/m. de pression de mercure résiduelle (environ 26 km d'altitude)

2) Dans le cas des rayons cosmiques, ces déductions n'ont pas une valeur très sûre : il y a lieu de se méfier tout d'abord d'une décomposition de courbe en composantes exponentielles simples ; on peut souvent effectuer une telle opération de plusieurs manières différentes, et l'erreur expérimentale autorise encore une plus grande latitude. La preuve en est donnée par la controverse entre deux des expérimentateurs les plus connus, au sujet d'une courbe d'absorption du rayonnement cosmique, que l'un décomposait en quatre, l'autre en deux composantes seulement.

D'ailleurs, on s'aperçoit actuellement qu'il est imprudent, dans le cas du rayonnement ultrapénétrant tel que nous le recevons, de parler de coefficients d'absorption, surtout en utilisant la chambre d'ionisation comme instrument de mesure : les ions produits dans la chambre peuvent provenir, en effet, des phénomènes les plus divers, dont les plus ionisants (qui sont en général secondaires, tertiaires, etc.» sont les plus marquants, et l'on ne sait pas non plus dans quelle mesure le rayonnement primaire est en équilibre avec ses secondaires. Un exemple peut éclairer cela : on a découvert récemment un effet, Steinke et Schindler) dont il sera question avec plus de détails ultérieurement [12]. Il y a, de temps en temps, libération brusque clans la chambre de quantités énormes d'ions ; les auteurs pensent que la cause en est l'éclatement d'un noyau atomique lourd avec projection d'un autre noyau très ionisant et de grande énergie, qui traverse le gaz de la chambre ; or, quelle que puisse être la nature de ce phénomène, il n'est pas du tout certain que son importance soit une fonction simple de l'énergie du rayonnement incident. Si un effet de ce genre, ou un effet de paroi, est dû plutôt à certaines sortes de rayons (phénomènes de résonance) qu'à d'autres, la courbe d'ionisation ne peut pas donner lieu à une interprétation simple, d'autant plus que l'influence d'un tel effet sur l'ionisation observée dépendra naturellement de la matière dont est faite la paroi de la chambre, de la forme de la chambre, et même aussi, pour des chambres homothétiques, de la valeur absolue des dimensions linéaires.

Ainsi l'on peut seulement déduire, de la lecture des indications fournies par une chambre d'ionisation, la connaissance du nombre de paires d'ions collectées dans un temps déterminé.

Même pour étudier la constance, en un point donné, du rayonnement (périodicités solaires, stellaires, etc.) il faut faire grande attention, car des effets importants peuvent apparaître et gêner l'observation ; on en trouvera une preuve dans les nombreux travaux des années 1931-1932 sur la recombinaison des ions dans une chambre en fonction de la pression et de la température du gaz [13, 14, 79].

DETECTION DES CORPUSCULES INDIVIDUELS

Ces considérations sur la méthode de la chambre d'ionisation montrent qu'il faut regarder avec une certaine circonspection les résultats (les expériences, même les plus soignées, faites par cette méthode, tant l'interprétation peut en être rendue difficile.

Si, actuellement, on commence à sortir (le cette complexité, c'est grâce aux méthodes de la chambre de Wilson et des compteurs à électrons qui, employés avec beaucoup d'adresse depuis peu, sont les plus aptes à donner des indications sur les phénomènes individuels du rayonnement cosmique, phénomènes pris isolément et non plus globalement comme précédemment.

UTILISATION ELEGANTE DE LA CHAMBRE DE WILSON

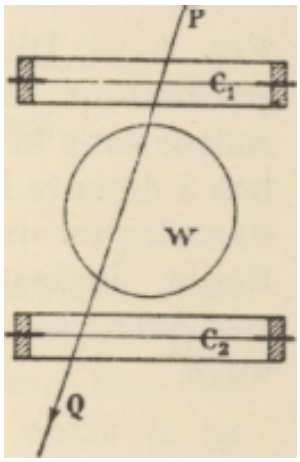
La méthode de la chambre de Wilson, qui est bien connue, permet de photographier la trace du passage (l'un corpuscule ionisant (1). Lorsque l'on fait des détentes en l'absence de toute source de rayonnement capable de produire une ionisation dans l'appareil, l'on obtient cependant parfois la trace du passage d'une corpuscule ionisant (2). Pour distinguer, parmi ces trajectoires, ce qui provient de la radiation cosmique (le ce qui provient des impuretés radioactives avoisinantes, on fait habituellement agir dans la chambre un champ magnétique qui, pour les électrons tout au moins, donne une indication énergétique, et l'on classe dans la catégorie (les phénomènes dus aux rayons cosmiques tous les corpuscules dont l'énergie est considérable.

(1) A ce propos on peut se demander s'il est toujours possible de distinguer facilement un rayonnement électromagnétique type gamma) d'un rayonnement corpusculaire (type électron). A vrai dire, pour les énergies auxquelles la radioactivité nous a habitués, il existe entre ces deux sortes de rayonnement des différences considérables et qui sont bien connues. Mais lorsqu'on passe du domaine de la radioactivité à celui de la radiation cosmique, on ne sait pas du tout comment se modifient les propriétés de ces deux formes de rayonnement : on a des raisons de penser que ces propriétés sont moins différentes pour ces grandes énergies qu'elles ne le sont pour des énergies plus faibles : ruais le seul critère expérimental que nous possédions pour les rayons cosmiques est déduit des clichés obtenus avec l'appareil de Wilson, et nous appellerons rayonnements corpusculaires ceux qui se manifestent ainsi par une ionisation continue le long de leur trajectoire à la manière des électrons ou des noyaux atomiques en mouvement rapide.

(2) Rappelons que l'appareil (le Wilson n'est sensible que pendant une petite fraction (le seconde autour du moment oh l'on effectue la détente (1/50 de seconde env.) et qu'il faut un temps de l'ordre (le 30 secondes pour que l'appareil soit à nouveau en état de fonctionner.

Mais les corpuscules ionisants du rayonnement cosmique sont rares et l'on est obligé de faire de nombreux clichés sans résultat pour avoir une chance d'en obtenir quelques-uns présentant des trajectoires de grande énergie [17 à 19].

Un progrès considérable vient d'être cependant réalisé à Cambridge au cours de ces derniers mois : Blackett et Occhialini ont réussi à obtenir des trajectoires de rayons cosmiques à chaque détente en faisant déclancher la chambre au moment du passage du corpuscule.



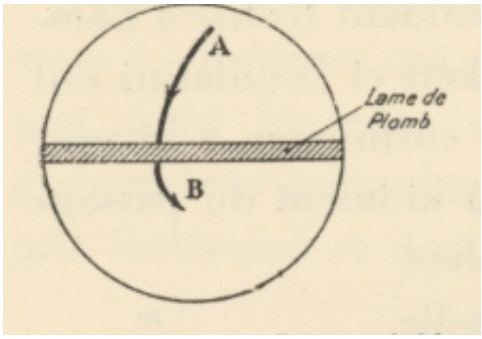
(fig. 3)
Schéma dispositif de Blackett-Occhialini.
Le corpuscule pénétrant PQ traverse les deux compteurs C1 et C2 et la chambre de Wilson W. C'est l'impulsion reçue par les compteurs qui provoque le déclanchement de la chambre à détente.

A cet effet [15, 16], ils ont placé deux compteurs à électrons de telle façon qu'un rayon très pénétrant (tel que P Q) traversant les deux compteurs soit obligé de traverser la chambre. Les impulsions de coïncidences des deux compteurs (voir plus bas) sont reçues dans des relais qui provoquent le fonctionnement de la chambre de Wilson. L'ensemble est (loué de fort peu d'inertie, si bien que le brouillard se forme un centième de seconde seulement après le passage de la particule dans les deux compteurs. Cette particule a libéré, tout le long de son parcours dans la chambre, des ions qui n'ont pas encore beaucoup diffusé au moment de la détente, et on réussit ainsi à produire sur cette ligne d'ions, à peine floue, les gouttelettes de brouillard.

C'est donc le passage même du rayon qui déclanche la photographie de sa trajectoire et cette méthode fort délicate, mais combien élégante, a déjà donné les résultats de tout premier ordre que nous indiquons plus loin (').

(') Toute explosion nucléaire, même spontanée, libérant des particules de très grande énergie peut être détectée par cette méthode.

La Chambre de Wilson permet ainsi d'obtenir des indications précieuses relatives aux corpuscules très pénétrants. Un des artifices employés pour cela consiste à placer une plaque métallique au milieu de la chambre, de sorte que le corpuscule traverse cette plaque (6 mm Pb par exemple). Comme il perd au cours de cette traversée une appréciable fraction de son énergie, la partie de sa trajectoire qui a précédé la rencontre avec la plaque sera moins déviée que l'autre par un champ magnétique uniforme que l'on fait agir dans la chambre, et la trajectoire aura l'aspect représenté ci-dessous.



(fig. 4).

Dispositif permettant de connaître dans la chambre à détente le sens dans lequel une particule ionisante a parcouru sa trajectoire.

On peut déduire, réciproquement, d'un tel cliché, un nombre important de renseignements: fout d'abord on est certain que le corpuscule a traversé la chambre dans le sens A B et non dans le sens B A et cette indication, jointe à la connaissance de la direction du champ, donne sans ambiguïté le signe de la charge électrique de la particule, ce qui est fort précieux. Par ailleurs, de la variation du rayon de courbure en A et en B on déduit la perte d'énergie due à la traversée de la lame métallique. Enfin, l'observation du brouillard de la trajectoire permet d'avoir des renseignements sur l'ionisation courante dans le gaz de la chambre, et par rapprochement avec la perte (l'énergie à la traversée de la lame, une indication de masse et de vitesse.

C'est ainsi qu'Anderson le premier [19 à 21], puis Blackett et Occhialini [15, 16] ont observé des corpuscules dont la masse est de l'ordre de grandeur de la masse de l'électron et dont la charge est positive ; ces corpuscules se comportent dans la chambre de Wilson comme des électrons (finesse du trait (le brouillard, production (le rayons S, etc.) qui seraient porteurs de la charge électrique + 1. C'est à ces corpuscules que l'on a donné le nom d'électrons positifs ou positrons (voir planche 2).

METHODE DES COÏNCIDENCES

On sait que l'on peut détecter le passage d'électrons (soit primaires, soit libérés par un effet secondaire d'un autre rayonnement) ou de corpuscules produisant une ionisation continue le long de leur trajectoire, au moyen de compteurs à électrons [22 à 24] (').

La forme habituelle de ces compteurs est représentée ci-dessous (fig. 5) ; c'est un tube métallique dans l'axe duquel un fil métallique très fin est tendu. Le gaz intérieur est à une pression (le quelques centimètres de mercure et un champ électrique permanent de l'ordre de 1.000 à 2.000 volts est établi entre le fil et le cylindre. L'axe est ô relié à un électromètre ou à un amplificateur à lampes.

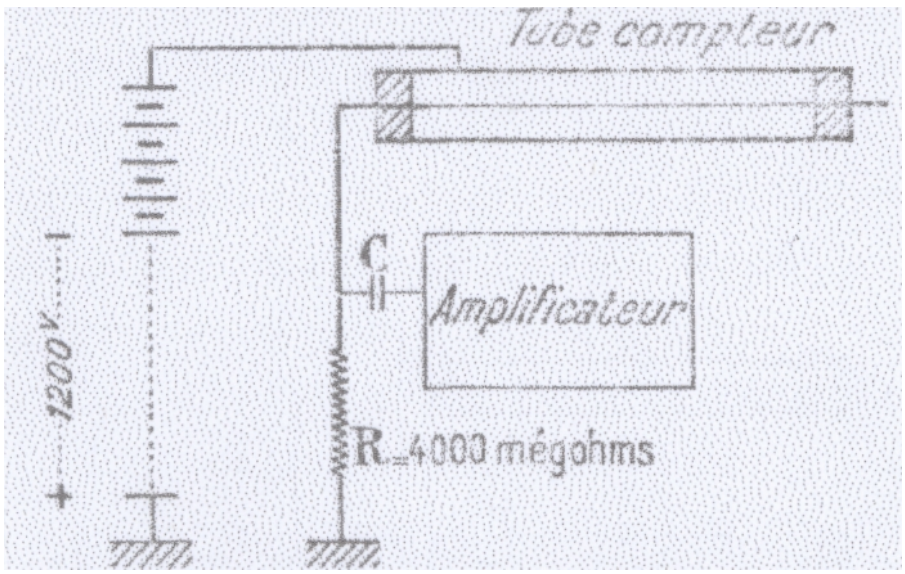


Figure 5. –
Compteurs à électrons (Geiger-Müller). Le prompteur est rempli d'un gaz sous faible pression. Une tension élevée est maintenue entre le cylindre de métal et un fil fin axial d'acier oxydé.

Lorsqu'un électron passe dans le gaz du compteur, les ions produits servent d'amorce à un début de phénomène disruptif et une impulsion est recueillie sur l'électromètre ou à la sortie de l'amplificateur. Il y a toujours, dans un tel compteur, lorsqu'il est bien réglé, un certain nombre d'impulsions spontanées. Elles sont dues à tout ce qui libère des corpuscules ionisants traversant le gaz intérieur, radioactivité des parois, du sol, radiation cosmique.

(') Nous rappelons que ces appareils indiquent seulement qu'un corpuscule ionisant a traversé l'atmosphère gazeuse du compteur, mais sans donner en général de renseignements sur l'énergie, la nature, la direction du corpuscule. Ils ont l'avantage d'être d'une extrême sensibilité, puisqu'il suffit de quelques paires d'ions libérées dans le gaz pour que le compteur fonctionne.

Afin de distinguer, parmi ces particules, celles qui sont douées d'un grand pouvoir de pénétration, on dispose deux ou trois compteurs de façon qu'un même corpuscule pénétrant puisse les traverser [25, 26]. Soient A, B, C (fig. 6) trois compteurs placés comme il est indiqué sur la figure : Si l'épaisseur des parois des compteurs est suffisante, aucun électron de provenance radioactive ne pourra en traverser plus d'un : un électron produit par un rayon Gamma dans la paroi du compteur pourra traverser le gaz de ce compteur et y provoquer une impulsion mais sera arrêté par la paroi opposée. Seul un rayon de très grand pouvoir de pénétration sera capable de traverser A, B, C. Les impulsions correspondantes seront simultanées, et, si on les fait arriver dans un appareil sélecteur qui laisse seulement passer les impulsions simultanées des trois compteurs, on détectera exclusivement le passage des rayons corpusculaires tels que P Q (1).

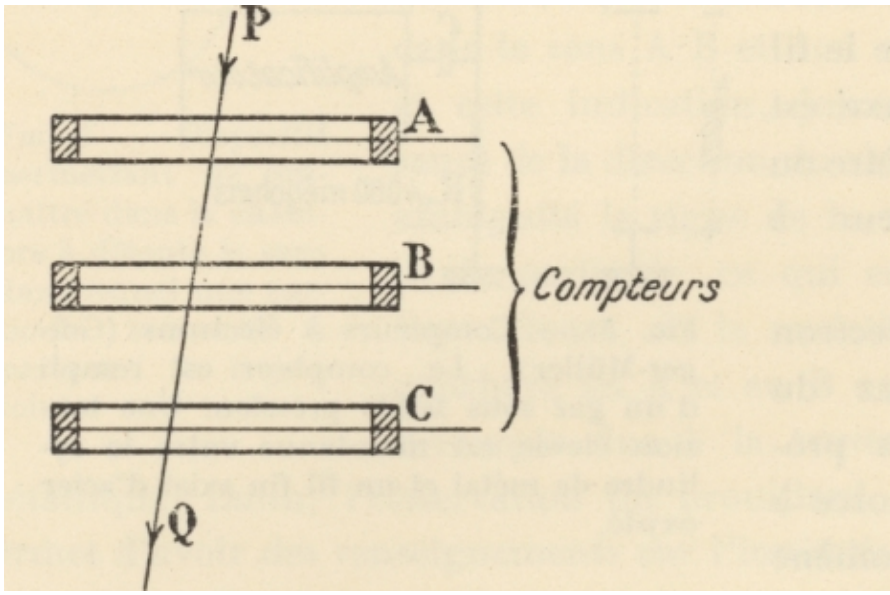


FIG. 6.
Compteurs disposés pour l'enregistrement sélectif des corpuscules de grande énergie les traversant tous trois (corpuscules tels que PQ).

Le dispositif à coïncidences triples (ou même double seulement) est un instrument remarquable, mais délicat à manier (2), pour l'étude des rayonnements très pénétrants dont il indique les passages individuels.

(1) Il faut penser que des impulsions spontanées des compteurs peuvent, par hasard, se trouver en coïncidence et faire croire au passage d'un rayon. Il est relativement facile de réduire le nombre de ces coïncidences fortuites à une valeur extrêmement petite, avec des compteurs propres et un appareil sélecteur d'un grand pouvoir séparateur.

(2) Il est évident, par exemple, que, si un rayon pénétrant produit une coïncidence entre les impulsions enregistrées par deux compteurs (fig. 7), la réciproque n'est pas vraie ; un rayon P. Q. libérant un secondaire tel que Q R, donnera une coïncidence : même avec des compteurs triples, un rayon traversant les deux premiers compteurs peut produire un secondaire qui traverse le troisième.

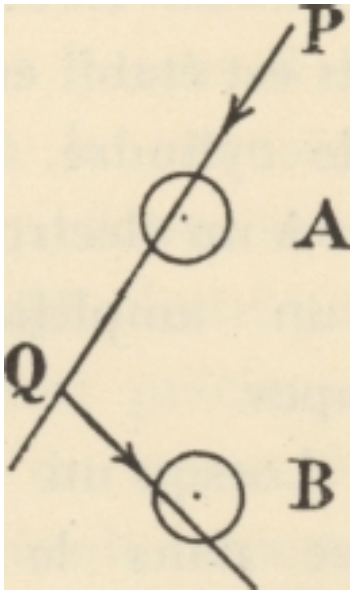


Fig. 7.
A et B sont deux compteurs à électrons. L'électron rapide PQ traverse A et produit en Q un secondaire traversant B.

Absorption de nombre

La méthode que nous venons d'indiquer nous oblige à définir une absorption particulière : Si l'on mesure le nombre de coïncidences entre des compteurs avec ou sans écran interposé, on aura des nombres correspondant à l'absence et à la présence de l'écran. Eu faisant varier l'épaisseur de l'écran, on pourra tracer une courbe donnant la diminution du nombre des coïncidences en fonction de l'épaisseur traversée. Une telle courbe représentera une absorption définie comme diminution du nombre des corpuscules traversant les compteurs. Il faut faire attention à la signification d'une telle absorption : si, par exemple, le rayonnement est composé de corpuscules très durs et de corpuscules mous, un écran arrêtera toute la partie molle et rien de la partie dure : Si tout le rayonnement supposé homogène, est suffisamment pénétrant pour n'être que freiné (mais non arrêté) par l'écran, on n'aura pas diminution du nombre des coïncidences.

Aussi est-il parfois imprudent de comparer une courbe d'absorption obtenue avec la chambre d'ionisation et une courbe de diminution de coïncidences ; il est difficile de tirer des conclusions de tels rapprochements.

DEUXIÈME PARTIE

Les indications concernant les méthodes d'investigation sont terminées. Nous allons passer maintenant à la seconde partie de cet exposé qui groupe la description simple des principales expériences, et l'indication des enseignements qu'elles comportent quant à l'énergie, aux propriétés, à la nature des rayonnements cosmiques.

1. Energie du rayonnement

Un premier fait saillant est qu'il existe des corpuscules d'un pouvoir de pénétration dépassant un mètre de plomb, corpuscules dont l'énergie ne peut être inférieure au milliard d'électron-volts. Voici les principales expériences qui ont permis cette conclusion :

1) Expériences de Rossi [27, 28]: Trois compteurs à électrons sont placés dans un même plan vertical (fig. 8), la distance séparant les deux extrêmes est de 1 mètre : Si l'on n'interpose aucun écran contre les compteurs, on note une coïncidence par heure (alors que le nombre des coïncidences dues au hasard est de une par 24 heures). L'appareil peut fonctionner pendant des semaines. En plaçant des absorbants de plomb entre les compteurs, le nombre de coïncidences diminue de la façon suivante :

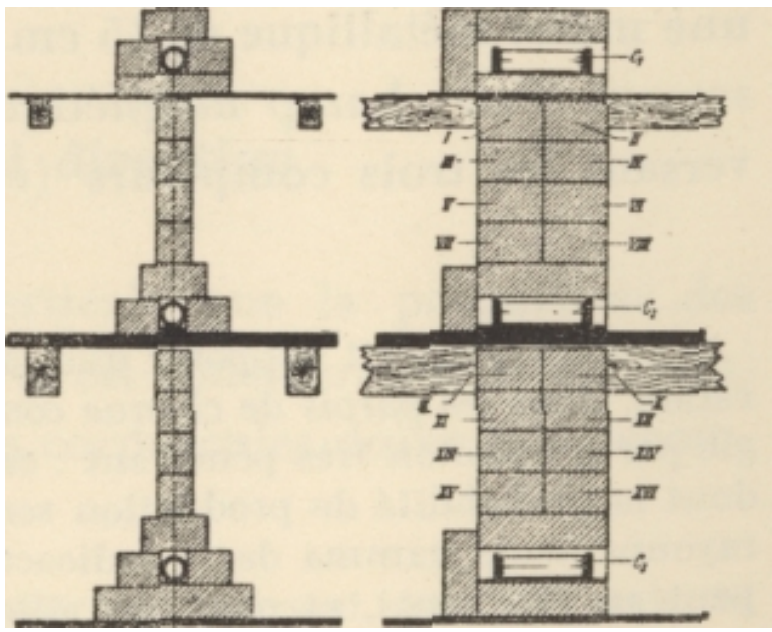


Fig. 8. — Expérience du mètre de plomb (Rossi)

Sans écran	100	coïncidences
10 cm écran	8	--
25 cm écran	74	--
101 cm écran	46	--

Les coïncidences sont bien dues à des particules traversant les trois compteurs : un rayon corpusculaire engendré dans le plomb par un photon ultra gamma ne donnera pas de coïncidences triples.

La forte diminution du nombre des coïncidences, lorsqu'on interpose les premiers centimètres d'absorbant, est due à l'arrêt de la partie molle, secondaire sans doute, accompagnant verticalement la partie corpusculaire de grande énergie. Mais le fait le plus important est que, suivant la verticale, près de la moitié des corpuscules du rayonnement cosmique sont capables de traverser un mètre de plomb (1)». On peut chercher à avoir une idée de l'énergie qu'il faut attribuer à un corpuscule de ce genre pour traverser cette quantité de matière. On trouve ainsi (2) deux à trois milliards d'électron-volts, sans tenir compte du fait que d'autres phénomènes que la simple ionisation courante peuvent distraire une part de son énergie au corpuscule ultrapénétrant.

2) Les expériences de Mott Smith [29] confirment l'existence de ces particules (3) : Entre les compteurs B et C d'un dispositif à coïncidences triples analogue à celui de Rossi, on interpose une masse métallique de 1 cm d'épaisseur qui servira à l'établissement d'un champ magnétique intense. Si les corpuscules traversant les trois compteurs (et aussi le bloc de fer) ne possédaient pas une énergie considérable, ils seraient déviés entre B et C par l'établissement du champ magnétique et il y aurait diminution du nombre des coïncidences triples.

(') On pourrait supposer que la coïncidence triple provient de la libération, dans les parois de chaque compteur, d'un corpuscule de faible énergie par un photon très pénétrant : ce serait, par exemple, un effet Compton dont la probabilité de production serait beaucoup plus grande que pour les rayonnements gamma de la radioactivité. Il est facile de montrer qu'il ne peut en être ainsi, et que, par ailleurs, les manifestations secondaires de semblables photons n'auraient pas échappé aux expérimentateurs.

(2) On sait que l'ionisation courante d'une telle particule dans l'air (observations de la chambre de Wilson) est de l'ordre de 40 paires d'ions par centimètre de trajectoire ; on passe de là, par la connaissance de l'énergie nécessaire à la production d'une paire d'ions dans l'air, à la perte d'énergie du corpuscule par unité (le longueur, et, par un calcul assez grossier, à l'énergie perdue dans la traversée d'un mètre de plomb.

(3) Une expérience analogue, effectuée par Curliss 135] montre que 30 % des particules ont une énergie supérieure au milliard d'électron-volts.

Les résultats de l'expérience sont négatifs, c'est-à-dire qu'une grande partie des corpuscules produisant les coïncidences triples doit avoir une énergie minimum de 2 milliards d'électron-volts si ce sont (les électrons et de 1 milliard d'électron-volts protons (1).

3) Actuellement, la découverte des électrons positifs et des gerbes rend plus incertaine l'interprétation des expériences de Mott Smith, mais l'ordre de grandeur des énergies indiquées doit être maintenu ; confirmation en est donnée par le: expériences faites avec la chambre de Wilson : la présence d'un champ magnétique uniforme de 12.000 à 18.000 gauss agissant dans l'intérieur (le la chambre sur une longueur de plus (le 10 centimètres, n'a pas permis à Anderson, d'une part, puis à Kunze d'autre part, de courber toutes les trajectoires d'une façon appréciable (fig. 9) un petit nombre d'entre elles possède une énergie que les auteurs évaluent à plusieurs milliards d'électron-volts [19 à 21, 30, 100] (2).

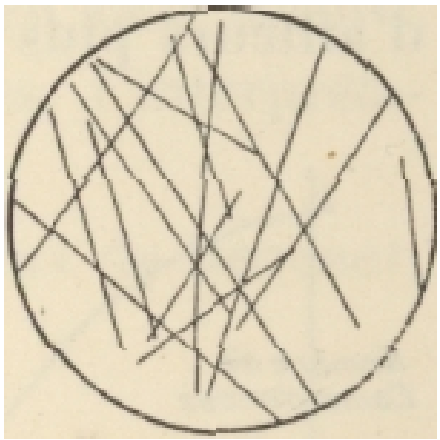


Fig. 9.
Quelques-unes des trajectoires de très grande énergie obtenues par Kunze à la chambre de Wilson (champ magnétique (le 18.000 gauss, 16 cm. de diamètre de chambre).

(') Il ne semble pas que ces corpuscules puissent être, en majeure partie tout au moins, des neutrons tels qu'on les imagine actuellement ; leur état électrique leur permettrait bien d'échapper à l'action du champ magnétique, mais le manque d'ionisation courante appréciable ne leur permettrait pas de produire d'ions dans la traversée (lu gaz des compteurs.

(2) Les expériences de Steinke et Schindler dont il sera question plus loin, concernent des libérations brusques de quantités d'ions énormes, correspondant à des énergies de l'ordre du milliard de volts. Cela conduit à des indications de même nature.

II. Energie et direction

C'est suivant la direction verticale que la proportion des corpuscules très pénétrants observés est considérable. Il est naturel de penser qu'une nappe de tels corpuscules doive être accompagne d'une grande variété de phénomènes secondaires ou tertiaires de moindre énergie, et c'est bien ce que l'on constate : Si la proportion d'éléments de faible énergie (quelques millions ou quelques dizaines de millions d'électrons-volts) n'est que du quart suivant la verticale, elle devient beaucoup plus importante quand la grille à rayons cosmiques formée par les compteurs est orientée suivant une direction faisant un grand angle avec la verticale ; les rayons corpusculaires dont la direction est à peu près horizontale sont beaucoup moins pénétrants, leur nombre est d'ailleurs plus petit.

Bernardini [31] et Johnson [32] ont tracé la courbe de distribution angulaire correspondante (fig. 10). On peut en expliquer simplement la forme en supposant un flux de rayonnement arrivant isotrope à la partie supérieure de l'atmosphère ; les rayons inclinés sur la verticale seront le plus absorbés en atteignant la surface terrestre (1).

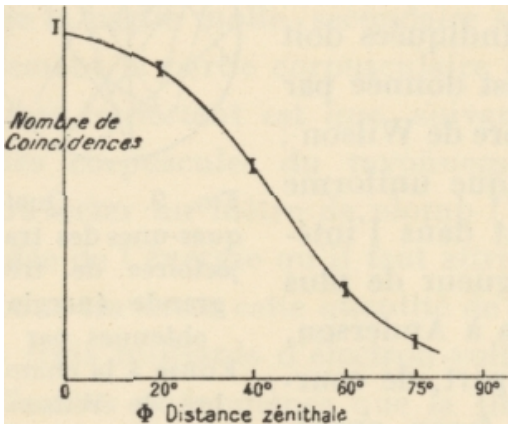


Fig. 10.
Courbe donnant nombre de particules du rayonnement cosmique en fonction de la distance zénithale (Bernardini).

On a trouvé récemment que les rayons venant de l'Ouest sont en nombre plus grand que ceux venant de l'Est, au voisinage de l'équateur géomagnétique. Cette dissymétrie n'existe pas sous les latitudes supérieures à 40 degrés ([33 à 37, 75, 80, 82 à 84, 92, 104J. On explique en général cet effet par l'hypothèse d'une prédominance de positrons dans la radiation cosmique [97].

(1) Si l'on considère un électron rapide arrivant verticalement sur la terre et ayant son origine en dehors (le l'atmosphère, on peut calculer l'énergie minimum qu'il doit posséder pour franchir l'atmosphère et toucher la surface terrestre 138]. On trouve 3,5 milliards d'électron-volts environ. Par ailleurs, un rayonnement de photons arrivant de la même façon aura besoin de posséder un quantum de quelques dizaines de millions d'électron-volts seulement pour produire des effets appréciables à la surface de la terre.

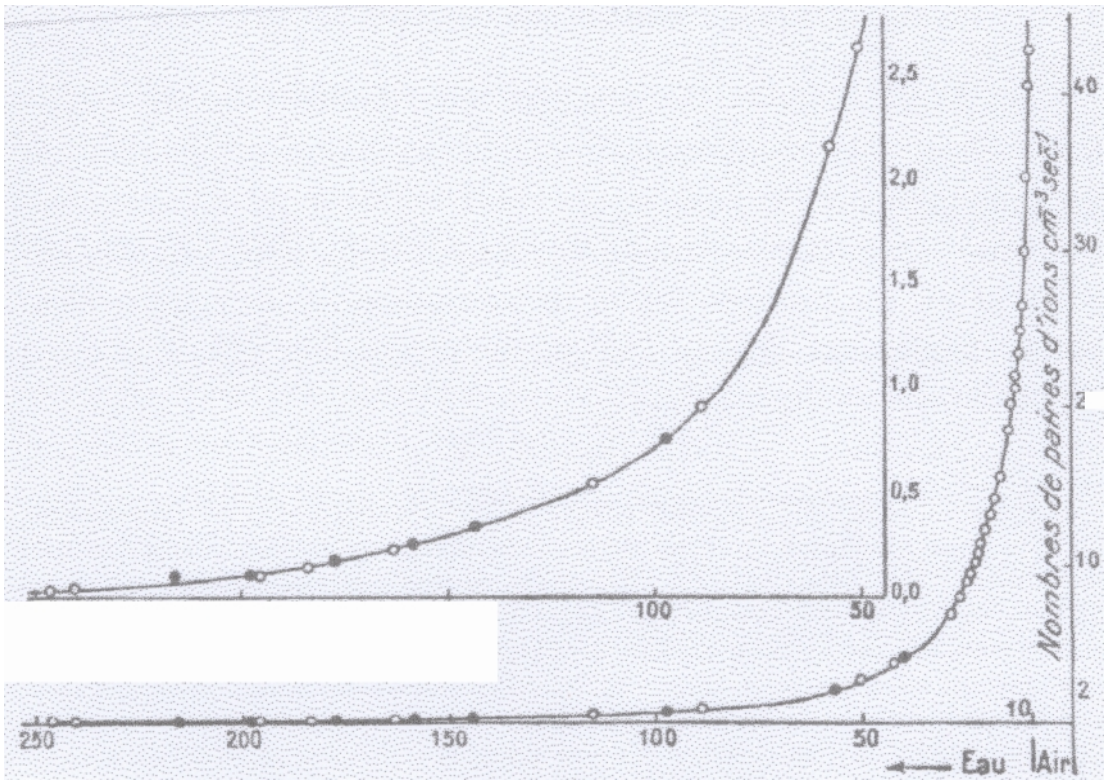
Courbe d'ionisation dans l'atmosphère

Une des bases expérimentales les plus solides est la connaissance de la variation du rayonnement cosmique lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère et lorsque l'on s'enfonce au-dessous du niveau de la surface terrestre. La courbe donnant l'ionisation produite clans une chambre close, quand on la transporte clans l'atmosphère et dans les lacs, a été obtenue par un grand nombre d'expérimentateurs très soigneux, et les résultats sont en bon accord. Mais si les données de l'expérience sont très sûres, l'interprétation est une des grosses difficultés du problème.

Nous nous attacherons spécialement aux travaux de Regener qui sont, dans ce domaine, les plus complets.

La courbe de Regener [39 à 43,86]

La courbe de Regener dans l'atmosphère a été obtenue au moyen de ballons-sondes porteurs d'appareils d'enregistrement automatique et de chambres d'ionisation remplies de gaz carbonique sous forte pression. Les meilleures précautions ont été prises pour tenir compte de tous les effets perturbateurs et les résultats sont représentés ci-dessous (fig. 11).



Épaisseur d'eau équivalente, depuis le haut de l'atmosphère

FIG. 11. — Intensité d'ionisation du rayonnement cosmique dans l'eau des lacs (Regenerl. Les abscisses sont exprimées en mètres.

Le point le plus élevé correspond à 18 mm de pression restante de mercure (altitude de 25 km) et à 333 paires d'ions par cc et par seconde, soit un effet près de 200 fois plus intense que l'effet, observé au niveau de la ruer. La partie de la courbe qui n'est pas indiquée (moins de 18 mm IIg de pression restante) serait évidemment d'un grand intérêt, mais on ne peut la connaître ; il semble pourtant qu'une extrapolation de la courbe vers la droite donne plutôt un palier qu'un maximum très accusé en P.

Regener a prolongé la courbe d'ionisation eu faisant des mesures dans le lac de Constance à différentes profondeurs. Il a trouvé que l'ionisation diminue quand la profondeur augmente, et qu'un effet certain est encore enregistré à plus (le 200 m de profondeur (1). L'ensemble des résultats qu'il a obtenus est représenté figure 11.

INTERPRETAION POSSIBLE DES COURBES DE REGENER

A) Voici d'abord l'explication que donne l'auteur [41] : Il fait l'hypothèse fondamentale que le rayonnement primaire est un rayonnement de photons arrivant en haut de l'atmosphère avec une répartition isotrope. Moyennant quoi, avec une décomposition en un nombre faible de composantes, la courbe s'explique facilement depuis 230 m de profondeur d'eau jusqu'à 25 km au-dessus du sol (2).

La composante la plus dure existant seule aux grandes profondeurs, peut se calculer facilement : on élimine alors son effet et on passe à la composante suivante.

(1) A. Corlin 197] aurait trouvé une composante plus pénétrante.

(2) Pour légitimer ce mode (le raisonnement, on fait les considérations suivantes : soit d'abord (fig. 13) une courbe exponentielle ordinaire (courbe cl, qui sera la courbe d'absorption par la matière d'un faisceau (A étroit, vertical, monochromatique, de photons. Si, au lieu de ce faisceau, on envisage un rayonnement analogue, monochromatique aussi, mais arrivant avec une répartition isotrope en haut de l'atmosphère, et absorbé en partie par elle, quelle forme peut-on prévoir pour la courbe d'absorption correspondante ? On s'en rend compte en partant du rayonnement A et en faisant les corrections suivantes :

1° Correction d'isotropie : les rayons primaires inclinés sur la verticale seront plus absorbés et la courbe aura une chute plus rapide que l'exponentielle e ;

2° Correction d'effet Compton, qui ajoute des rayons secondaires au faisceau et qui compense en partie la correction précédente (dans la courbe d'absorption exponentielle e, un photon qui a produit un effet Compton est, au contraire, éliminé du faisceau et l'électron de Compton n'intervient pas).
Le calcul montre que, à moins de 10 % près, la courbe obtenue est alors identique à la courbe A. Cela légitime la simplification que fait Regener lorsqu'il cherche à expliquer sa courbe au moyen de quelques exponentielles simples.

Le tableau de la figure 12 donne les coefficients d'absorption et les intensités des cinq composantes ainsi trouvées : I∞ et I_o sont le nombre de paires d'ions par cm^3 et par seconde dans l'air TPN, à l'entrée de l'atmosphère (I∞.) et au niveau de la mer (Io)

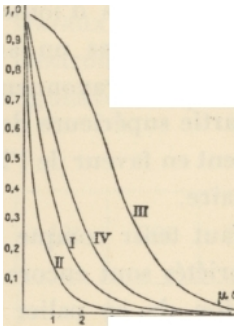
Composantes	ug⁻' cm²	I∞	Io
H_2	205 . 10^{-3}	0,16	0,15
H_1	0,735 . 10^{-3}	1,2	0,86
M	2,00 . 10^{-3}	3, 2,	0,98
W1	4,1 . 10^{-3}	] 328	]0,7
W_2	8,5 . 10_^{3}	]	]

FIG. 12. —Tableau donnant, d'après Regener, les caractéristiques des diverses composantes du rayonnement.

B) Ainsi Regener admet tout d'abord que le rayonnement primaire est de nature ondulatoire, puis il légitime cette hypothèse.

Mais on peut procéder autrement et chercher à interpréter la courbe en supposant au contraire un rayonnement corpusculaire de particules chargées arrivant en haut de l'atmosphère. Voici alors les idées que l'on développe :

Imaginons d'abord que l'on déplace l'appareil de Regener au sein d'une masse de gaz à la partie supérieure de laquelle arrive un rayonnement gamma ou un rayonnement pénétrant monocinétique et de propriétés semblables à celles des rayons (lue l'on connaît ; la manifestation sera différente suivant la nature de la radiation. La courbe donnant l'ionisation en fonction de l'épaisseur du fluide interposé aura la forme A ou la forme B (fig. 14) lorsque le rayonnement primaire sera constitué de photons ou d'électrons. Le point de départ sera différent, car les électrons produisent déjà, même lorsqu'ils ne sont pas accompagnés de phénomènes secondaires, une ionisation continue le long de leur trajectoire alors que les photons ne produisent d'effets que lorsqu'ils ont donné naissance à des rayonnements secondaires. Dans les deux cas, il y aura un maximum pour une certaine épaisseur d'absorbant traversée [45] et, réciproquement, la présence d'un maximum dans les courbes d'ionisation du rayonnement cosmique avec l'altitude n'est pas un argument en faveur de la nature électromagnétique du rayonnement primaire. Le palier que l'on trouve à la partie supérieure de la courbe de Regener serait plutôt un argument en faveur de l'hypothèse corpusculaire du rayonnement primaire.



I Fonction e
II Fonction e pour répartition isotrope
III Fonction e avec rayonnement dispersé
IV Fonction e avec rayonnement dispersé pour une répartition isotrope

r

FIG. 13. Absorption d'un rayonnement gamma dans diverses conditions (Kremer, Kulenkampf).

Mais il faut tenir compte de la complexité de la radiation, dont les propriétés sont encore connues d'une façon incertaine ; la considération de ce palier doit indiquer seulement que la radiation primaire n'arrive pas saturée des rayonnements secondaires en équilibre avec elle, et ne peut être un argument décisif en faveur de l'une des hypothèses.

Le reste de la courbe (parties pénétrantes de la radiation), peut, par contre, s'expliquer d'une façon simple en imaginant qu'un faisceau d'électrons (ou autres corpuscules) de grand pouvoir pénétrant arrive vers la terre avec une distribution maxwellienne d'énergie [381 : diminution exponentielle du nombre des électrons pour un accroissement linéaire de l'énergie (').

Nous verrons plus loin quelles autres considérations militent pour et contre les diverses théories relatives à la nature de la radiation pénétrante.

(1) Pour rapprocher une courbe d'absorption d'électrons de la courbe d'absorption $I = I_{\circ} e^{-px}$ d'un faisceau de photons, on écrira [381 que l'on a affaire à un spectre corpusculaire continu et que le nombre N d'électrons traversant une épaisseur x de matière est donné par $N = N.e^{-\lambda\varepsilon}$; on peut, en première approximation pour des électrons très rapides, considérer le parcours comme proportionnel à l'énergie s et écrire $N = N.e^{-\lambda\varepsilon}$ Pour déterminer λ, Clay s'appuie sur la valeur du coefficient d'absorption (Regener) de la partie pénétrante de la courbe et sur l'énergie nécessaire à un électron pour traverser l'atmosphère terrestre.

Effet de latitude

Voici maintenant une autre face du problème : le rayonnement est-il absolument constant sur la terre quelle que soit la latitude du point où la mesure est faite ? ou bien son intensité est-elle fonction de cette latitude ? C'est une question difficile à résoudre expérimentalement, mais dont

l'éclaircissement apporterait les renseignements les plus précieux : la raison en est que le champ magnétique dû à la terre n'a pas d'action sur un rayonnement de photons, alors qu'il doit courber les trajectoires de corpuscules chargés qui se dirigeraient vers nous et interdire une répartition uniforme aux diverses latitudes.

Les trajectoires d'un faisceau hétérogène de tels électrons s'enrouleront autour des lignes de force du champ, et seuls les plus énergiques pourront atteindre la terre loin des pôles magnétiques. Le tableau suivant, dû aux travaux de Stiirmer, donne les énergies que doivent posséder des électrons pour pouvoir atteindre la terre à certaines distances angulaires du pôle magnétique [46 à 49, 77. 95].

H (distance angul[re] du pôle)	20°	40°	60°	80°	90°
E (énergie mini. des électrons en millions de volts).	200	2 500	6 500	9 600	10 200

La figure 16 donne un complément de prévisions d'après les travaux de Lemaître et Vallarta. Ainsi l'on prévoit que seuls des électrons de plus de 10 milliards d'électron-volts sont capables d'atteindre l'équateur magnétique (fig. 15).

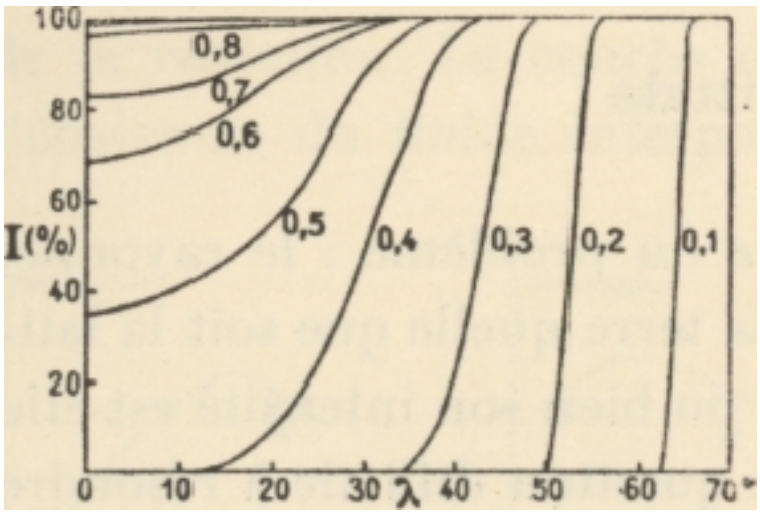


Fig. 15. — Variation du rayonnement cosmique selon la latitude magnétique (Table de Lemaître et Vallarta). Chaque courbe correspond à une valeur de x_o.

Aussi la question de la variation du rayonnement corpusculaire cosmique avec la latitude est-elle d'une importance primordiale pour nous faire connaître la nature de la radiation primaire. A vrai dire, de nombreuses expériences ont été faites en prenant les indications d'un même appareil sous différentes latitudes [50 à 52]; Mais, outre les difficultés inhérentes au transport et à l'installation, en des points très différents, d'appareils délicats, la seule méthode utilisée jusqu'à présent pour ces expériences fut celle de la chambre d'ionisation, qui ne permet pas facilement de recueillir seulement les rayonnements arrivant dans une direction déterminée, ni d'en connaître l'énergie.

x_0	Electrons (10^{10} volts)	Protons (10^{10} volts)	Particules (10^{10} volts)
0,1	0,0596	0,01722	0,01722
0,2	0,238	0,1618	0,2318
0,3	0,536	0, 449	0, 760
0,4	0,954	0,861	1,564
0,5	1,490	1,397	2,625
0,6	2,145	2,050	3,928
0,7 0,	2,920	2,823	5,46
8	3,821	3,719	7,25
0,9	4,830	4,729	9,27
1,0	5,96	5,85	11,52

Tableau donnant l'énergie des électrons, protons, particules α pour différentes valeurs de xo

Variation avec la latitude. — Les premières expériences pour découvrir comment le rayonnement cosmique (c'est-à-dire les effets observés dans une chambre d'ionisation remplie de gaz sous pression) se comportait en des points de latitude différente, avaient indiqué une invariance du rayonnement, mais au cours de l'année 1932, il s'est trouvé que deux séries de recherches, indépendantes l'une de l'autre, ont montré l'inverse. Ce furent d'abord les expériences de Clay et Berlage [53 à 55], qui, transportant une chambre d'ionisation d'Amsterdam à Java, ont trouvé une diminution de 15 % de l'ionisation entre les deux extrémités (fig. 15). La courbe, prise d'une façon continue (à bord d'un navire) et avec un appareil toujours placé dans les mêmes conditions, peut être considérée comme une première indication sérieuse. Les autres expériences sont celles de A. H. Compton et de ses collaborateurs [56 à 58, 60]; au cours d'une très grande série de recherches

effectuées en de nombreux points de la surface du globe, on a trouvé une variation régulière et systématique de l'ionisation observée dans une chambre en fonction de la latitude du lieu d'observation. Le maximum de différence entre les ionisations spécifiques est de 14 % au niveau de la mer et croît avec l'altitude : 22 % à 2.000 mètres.

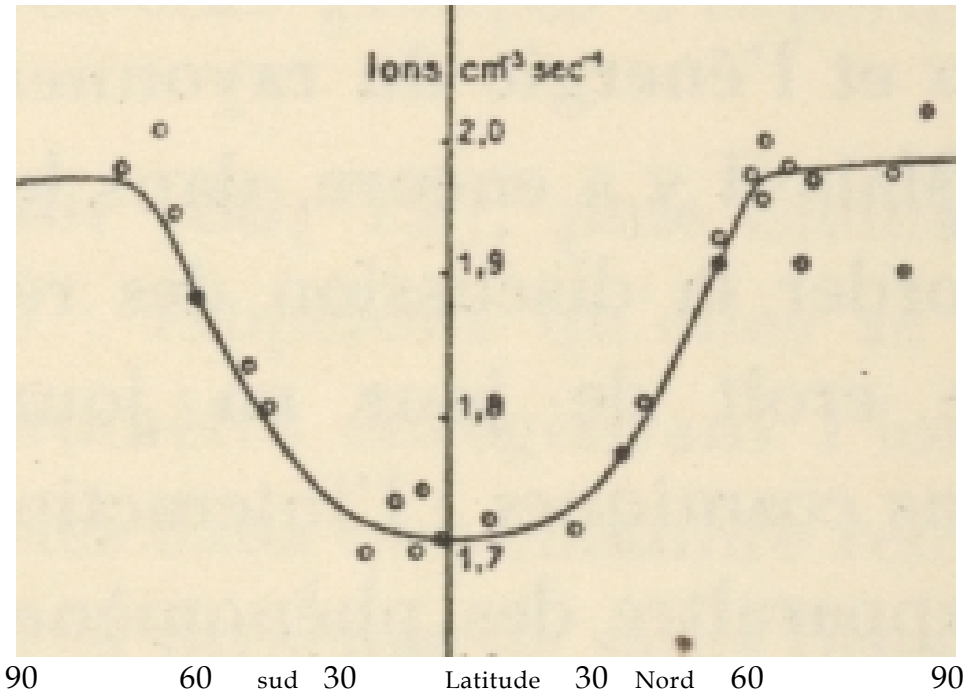


Fig. 16. — Courbe donnant l'effet de diminution aux faibles latitudes de l'ionisation observée dans une chambre (Compton, Clay et Berlage, Bonnet et Dunham, Vollen, Naudé).

Ainsi, bien que la question ne soit pas encore, du point de vue de l'expérience, absolument tranchée (1), il se trouve pourtant des indications en faveur de la diminution du rayonnement cosmique aux faibles latitudes. S'il était possible de faire, au moyen de coïncidences entre compteurs à électrons, des mesures du nombre et de l'énergie des corpuscules cosmiques suivant une direction déterminée et sous diverses latitudes, on obtiendrait sans doute des résultats plus précieux. (Voir la note sur un travail récent, p. 39.)

(1) Voir aussi Hœrlin [93] et Prins [94].

L'effet de latitude semble d'ailleurs ne se faire sentir que dans la zone comprise entre l'équateur magnétique et 45°. Entre 45⁰ et le pôle, tous les expérimentateurs ont trouvé une constance du rayonnement [50, 52. 88]. La courbe ci-contre (fig. 16) donne l'ensemble des résultats. Ce n'est pas une courbe obtenue par un seul, elle groupe les résultats de chercheurs variés (1)

(1) La constance du rayonnement entre le pôle magnétique et 45° de latitude peut s'expliquer par l'intervention de l'atmosphère terrestre [38] : en effet des électrons arrivant jusqu'à la terre doivent posséder une énergie suffisante pour ne pas être absorbés par l'atmosphère ; cette énergie est 3,5 X 10^9 colts pour les rayons verticaux, 6 X10^9 volts en moyenne pour ceux de toute direction. Des électrons d'une énergie inférieure ne peuvent atteindre la terre nulle part. Or cette énergie de 3,5 X 10^9 volts est précisément celle qui correspond à la rencontre de la zone interdite de Stirmer et de la terre 5 la latitude de 45° C'est donc seulement entre 45° et l'équateur magnétique que le rayonnement devra varier, si, toutefois, il s'agit bien d'un rayonnement primaire corpusculaire chargé électriquement.

IV. Propriétés du rayonnement cosmique.

En résumé, nous venons de voir quelles sont les quelques bases expérimentales importantes que 1'on possède sur la répartition et l'énergie du rayonnement.

Mais il y a encore, dans le domaine de l'expérience, et avant d'aborder la discussion des résultats, un chapitre dont l'importance croit de jour en jour, c'est celui des propriétés des rayons cosmiques : l'interaction avec la matière qui nous entoure fait apparaître des phénomènes nouveaux très différents de ceux auxquels nous avait accoutumés la connaissance des rayonnements de la radioactivité. L'étude de cette interaction est délicate parce que le phénomène est rare et que son grand pouvoir de pénétration rend la détection difficile, mais les nouvelles méthodes expérimentales (appareil de Wilson déclanché par les coïncidences entre deux compteurs) permettent de progresser rapidement. On peut dire dès maintenant que dans certains domaines tout au moins, cette interaction s'effectue d'une façon qu'il était impossible de prévoir il y a quelques mois seulement et cette connaissance va sans doute permettre de grands progrès dans l'étude (le la constitution des noyaux atomiques et des propriétés des rayonnements pénétrants.

TRANSMUTATIONS PAR LES RAYONS COSMIQUES (1)

Il apparaît d'abord que si le rayonnement cosmique agit en partie connue un rayonnement d'électrons rapides par ionisation continue (interaction avec les électrons des couches de Bohr des atomes), il agit aussi fréquemment d'une façon fort différente : cette action, qui, dans la plupart des cas, semble être

plies complexe qu'un simple phénomène de choc nucléaire, est du domaine des transmutations. Plusieurs groupes d'expériences le montrent.

a) Les expériences de Hoffmann [59, 12], puis Steinke et Schindler, ont déjà été décrites (2) rappelons qu'elles se rapportent aux indications d'un électromètre enregistrant l'ionisation produite par les rayons cosmiques dans une chambre remplie de gaz sous pression ; elles montrent la présence de sauts brusques correspondant à l'arrivée, rare d'ailleurs, de phénomènes très ionisants (production de plusieurs millions de paires d'ions simultanément). Cet effet se produit surtout lorsque l'appareil est entouré d'une cuirasse de plomb et les auteurs l'attribuent à l'arrivée de noyaux atomiques provenant d'une transmutation du plomb par les rayons cosmiques. Ces sauts d'ionisation ont été retrouvés par Compton et ses collaborateurs [60] au cours de mesures effectuées à haute altitude ;

b) On peut signaler que des expériences faites par Rossi (3) [61] au moyen de trois compteurs non situés dans un même plan, sont favorables à l'hypothèse d'une transmutation, quoique n'étant pas décisives ; de même les indications obtenues par les physiciens qui ont utilisé la chambre de Wilson [82, 62, 19] (présence fréquente de trajectoires doubles ou multiples) sont aussi favorables à une telle hypothèse.

(') Sous ce titre, nous envisageons plusieurs processus possibles : soit transmutation de noyaux sous l'action de rayons cosmiques, soit matérialisation de paires d'électrons par rayons cosmiques, soit explosion de la particule cosmique, sans spécifier quel mode est le bon, vu la difficulté d'expliquer les phénomènes observés.

(2) Cf. L. Leprince Ringuet : Les transmutations artificielles, Hermann, éditeur, 1933, Paris.

(3)Des expériences analogues ont été faites par Sawyer [98] et par Fünfer [99].

Mais les expériences décisives sont celles qui ont été réalisées tout récemment par Anderson en Amérique, puis par Blackett et Occhialini à Cambridge. En voici l'essentiel :

C) expériences d'Anderson [19 à 21, 89]

Au moyen d'une chambre de Wilson à axe horizontal et dans lequel on fait agir un champ magnétique uniforme puissant (12.000 gauss) on étudie les trajectoires du rayonnement cosmique. L'auteur a pu obtenir, issues simultanément d'un même point, plusieurs traces, dont certaines correspondaient à (les corpuscules doués d'une énergie trop grande pour être courbées par le champ, et dont les autres présentaient une courbure ; sur le même cliché, les courbures sont dans un sens, pour plusieurs rayons, dans l'autre pour plusieurs autres (') . De tels clichés indiquent l'existence de corpuscules possédant une charge positive pour les uns, négative pour les

autres : L'interposition d'un écran de plomb sur le trajet de ces particules (voir ci-dessus) et l'aspect des trajectoires de brouillard permet tout d'abord de connaître avec certitude le sens de description des trajectoires, puis (l'avoir (les indications sur la valeur de la charge et de !a masse des différentes particules déviées par le champ magnétique. C'est ainsi que l'auteur est arrivé à la conclusion que ces gerbes contenant parfois plus de 20 rayons) renfermaient des électrons négatifs, des électrons positifs et des corpuscules non déterminés d'une énergie trop grande pour subir l'action déviatrice du champ.

(') Ce phénomène est un phénomène rare : le plus souvent on voit une seule trajectoire très pénétrante sur le cliché ; il va de soi que cette trajectoire peut être elle-même une branche d'une de ces gerbes.

d)Expériences DE BLACKETT ET OCCHIALINI

Presque simultanément, à Cambridge, Blackett et Occhialini, grâce à la méthode de la chambre de Wilson actionnée par le passage du rayon cosmique (1) à travers deux compteurs, ont pu étendre les résultats d'Anderson. Tout d'abord ils ont confirmé l'existence de l'électron positif, qui semble donc devoir être classé parmi les constituants des noyaux atomiques, puisque ces gerbes représentent vraisemblablement des explosions nucléaires sous l'effet des rayons cosmiques (') : Ils ont trouvé une proportion à peu près égale d'électrons positifs et d'électrons négatifs déviables par un champ (le 3.000 gauss.

Sur plusieurs clichés apparaissent aussi des trajectoires de noyaux atomiques ; en particulier, au cours d'une désintégration du cuivre (lame de cuivre ; située au milieu de la chambre) on enregistre un proton dont l'énergie restante à la sortie de la lame est de l'ordre du million d'électron-volts (2).

Souvent aussi un phénomène assez extraordinaire se manifeste : c'est la présence, sur le même cliché, d'un grand nombre de trajectoires semblant provenir non pas d'un même point, mais (le deux ou plusieurs centres : tout se passe comme si, simultanément, plusieurs explosions se produisaient en des points différents, sous l'effet d'une cause première unique : quel est l'agent de cette correspondance. On ne le sait encore, mais on peut imaginer, au cours d'une première explosion, la libération, soit de, photons, soit de neutrons (3) soit même de rayonnements ionisants, dont la probabilité d'interaction avec la matière serait suffisamment grande pour permettre, par leur intermédiaire, une autre explosion nucléaire à peu de distance de la première (4).

Si l'on pouvait vérifier cette hypothèse, on rapprocherait ainsi la physique des très grandes énergies de la chimie des explosifs, puisque les explosions nucléaires perdraient leur caractère isolé, et l'on aurait connaissance d'une

sorte de propagation des explosions de noyaux atomiques. (Voir à ce sujet la préface de M. M. de Broglie dans l'exposé N° 55 (les transmutations artificielles) de cette même collection.

Quelle est la radiation responsable des gerbes P On l'ignore, mais on pense que ce n'est pas la radiation primaire. Ce serait, d'après Blackett et d'après Rossi [90] un rayonnement intermédiaire de faible pouvoir pénétrant. Enfin, on peut dire vraisemblablement que l'existence de ces gerbes complexes est un élément nouveau appelé à fournir des renseignements précieux sur la constitution des noyaux atomiques (¹). Puisque les énergies des rayonnements cosmiques sont extrêmement grandes en regard des énergies de liaisons nucléaires, on est enclin à penser que les constituants des noyaux atomiques peuvent être considérés comme presque libres l'un par rapport à l'autre au regard des rayons cosmiques, et cette considération permet d'espérer beaucoup de renseignements des études sur ces sortes de transmutations.

(¹) Cela n'est pas certain. Il se peul que tout ou partie soit formé par matérialisation de corpuscules, lors (le l'arrêt d'un rayonnement primaire par la matière, comme cela se produit lorsqu'un photon du 'l'hC"" donne naissance à deux électrons (le signe opposé.

(²) La présence de noyaux atomiques est difficile à déceler, vu la rapidité du freinage par la matière (le ces noyaux, même lancés à très grande vitesse.

(³) Ils paraissent avoir été mis en évidence au cours d'observations récentes [103, 105].

(⁴) Le grand pouvoir de pénétration de la plupart de ces rayons permet d'enregistrer sur un même cliché de la chambre de Wilson des corpuscules provenant d'explosions ayant eu lieu à de notables distances l'une de l'autre (plusieurs dizaines de centimètres de matière solide).

Note sur la nature des rayonnements

Notre travail objectif est terminé. Les quelques lignes qui suivent concernent des hypothèses relatives à la nature et l'origine du rayonnement. Elles sont présentées seulement comme indication d'explications que l'on peut proposer n'est d'ailleurs pleinement convaincante.

HYPOTHESE D'UN RAYONNEMENT PRIMAIRE ELECTROMAGNETIQUE.

Si l'on ne s'occupe pas du mode et du lieu de production des rayons cosmiques, on fait souvent, sur leur nature, l'une des deux hypothèses suivantes : le rayonnement primaire serait formé soit de corpuscules chargés, soit de photons (¹). La théorie d'un rayonnement électromagnétique primaire a été indiquée plus haut (Millikan [66], Regener [41]). Elle ne donne pas d'interprétation facile de l'effet de latitude ; elle doit supposer que des photons arrivent en haut de l'atmosphère avec une répartition uniforme. Or ce dernier

caractère (qui est loin d'être prouvé avec certitude) oblige à chercher l'origine du rayonnement en dehors de toute agglomération de matière, clans l'espace interstellaire, ce qui présente des difficultés et est fort lointain.

(1) Il est vraisemblable que les différents éléments ne réagissent pas de la même façon et ne donnent pas le même spectre de gerbes, spectre qui peut être très divers puisque le nombre des produits de l'explosion, leur direction, leur nature, leur énergie sont autant de variables. Un travail tout récent de Messerschmidt [102] montre déjà que le Plomb, le Fer, l'Aluminium et le Carbone donnent des résultats différents.
L'étude de ces spectres, à peine commencée, ouvre un chapitre tout nouveau et fort important de la constitution de la matière.

(2) L'hypothèse de neutrons primaires semble devoir être écartée [81].

THÉORIES CORPUSCULAIRES.

Les théories corpusculaires échappent à ces difficultés : l'un de leurs avantages est de ne pas exiger une distribution spatiale uniforme de la radiation, car l'action du champ terrestre peut rendre à peu près uniforme en haut de l'atmosphère un rayonnement corpusculaire hétérogène provenant seulement de quelques points de l'espace, — cela ouvre la voie à une orientation des recherches vers une origine moins éloignée de nous, système solaire ou galactique par exemple.

Un autre (le leurs avantages (hypothèse de Clay : spectre d'électrons primaires à distribution maxwellienne) est de libérer les courbes de Regener d'une interprétation presque nécessaire et assez peu satisfaisante, et aussi de pouvoir expliquer l'effet de prédominance, sous certaines latitudes, des rayons venant de l'ouest en supposant des électrons positifs eti majorité dans la radiation.

Tout compte fait, si l'on ne considère que le rayonnement au niveau de la mer ou sur la surface de la terre, c'est l'hypothèse corpusculaire qui se montre la plus satisfaisante, car elle ne rencontre guère de difficulté. Mais si l'on envisage l'action des rayonnements pénétrants sur la partie haute de l'atmosphère, on ne peut expliquer facilement ainsi l'augmentation considérable de l'ionisation : on voit, sur la courbe de Regener, que plus de 98 % de l'effet est absorbé dans l'atmosphère : si ce sont des corpuscules primaires chargés qui produisent cet effet prédominant, leur énergie ne doit guère dépasser le milliard de volts ; ils ne peuvent alors provenir d'espaces éloignés, car leur énergie est trop faible pour leur permettre de traverser la zone d'action du champ magnétique terrestre et parvenir jusqu'à une vingtaine de kilomètres au-dessus de la surface du sol.
Il faudrait alors admettre que ces électrons se forment à peu de distance de la terre, ce qu'ont fait, séparément, C.T.R. Wilson et Dauvillier (1)

(') Voir aussi la tentative faite par Clay [69], cherchant à montrer que des rayons corpusculaires primaires de très grande énergie doivent donner un nombre considérable de secondaires ionisants dans les parties hautes de l'atmosphère.

THEORIE DE C.T.R. WILSON [67 et 68]. —

C.T.R. Wilson pense trouver dans les champs électriques des orages une explication de l'origine de la radiation : (les différences de potentiel de 10' et parfois 10" volts existent dans les nuages (l'orage, et des électrons de ces énergies seraient projetés vers le haut et retrouveraient la surface de la terre après avoir été courbés par le champ magnétique.

Cette théorie s'accorde difficilement avec l'uniformité du rayonnement dans le temps, et avec la nécessité de mettre en jeu (les énergies notablement plus considérables que 10' ou 10" volts pour permettre à des électrons de traverser 230 mètres d'eau ; mais il est probable qu'une partie de la radiation molle a son origine dans les orages.

DAUVILLIER [63 à 65, 88] cherche à rattacher au soleil la source des rayons cosmiques : dans une théorie de l'aurore polaire, il prévoit l'existence autour (le notre globe et à une distance de l'ordre du rayon terrestre, d'une enveloppe complète de trajectoires d'électrons. Ces électrons, provenant du soleil, auraient une énergie de quelques milliards de volts et leur présence pourrait suffire à expliquer les phénomènes observés par l'intermédiaire d'une radiation (les photons). Il y a lieu d'attendre, pour savoir si l'on doit accepter une hypothèse de ce genre, que des mesures de longue durée aient permis de rattacher au cycle solaire une périodicité éventuelle de l'intensité du rayonnement en fonction du temps. Les mesures de Hess [911 qui mettent en évidence une faible variation du rayonnement en fonction du temps local favorisent cette hypothèse.

Bien d'autres théories [70 à 73, 96] sont encore données dont certaines relient le problème des rayons cosmiques aux problèmes cosmogoniques les plus difficiles ; elles ont un réel intérêt, maïs reposent sur des bases trop fragiles pour entrer dans le cadre de cet exposé [101].

Il est probable que l'on sera fixé dans peu d'années sur la nature du rayonnement ultrapénétrant, et sur ses principales propriétés. On pourra alors, avec plus de garanties qu'on en possède actuellement, aborder le problème de son origine (1).

(')Il faut penser que l'effet observé dans l'atmosphère e1 celui observé sous 230 mètres d'eau ont peut-être une nature et une origine différentes.

Louis LEPRINCE-RINGUET.

Note sur un travail récent.

En septembre et octobre 1933, une expédition fut effectuée par M. P. Auger et nous-même, dans le but d'acquérir une certitude sur la diminution du rayonnement cosmique au voisinage de l'Equateur. A cet effet, nous avons employé comme méthode de détection non plus la chambre d'ionisation, seule utilisée jusqu'alors pour des recherches de ce genre, ruais des dispositifs à coïncidences tels que ceux décrits plus haut, qui dénombrent les corpuscules individuels. Trois de ces dispositifs, installés sur un paquebot de la Compagnie des Chargeurs Réunis qui effectuait le trajet du Havre à Buenos-A yres et retour, ont enregistré sans arrêt les particules ionisantes du rayonnement cosmique [751. Les trois appareils ont ainsi détecté le passage de 170.000 rayons, et ont indiqué une diminution de 16 % aux faibles latitudes du nombre des paᵗticules arrivant au voisinage de la verticale. Ils ont aussi confirmé l'existence d'une prédominance des rayons venant de l'ouest aux faibles latitudes.

Il est donc maintenant prouvé que le champ magnétique terrestre agit sur le rayonnement cosmique, et l'on peut dire que, au moins aux distances de l'ordre du rayon terrestre, tout ou partie de ce rayonnement est corpusculaire.

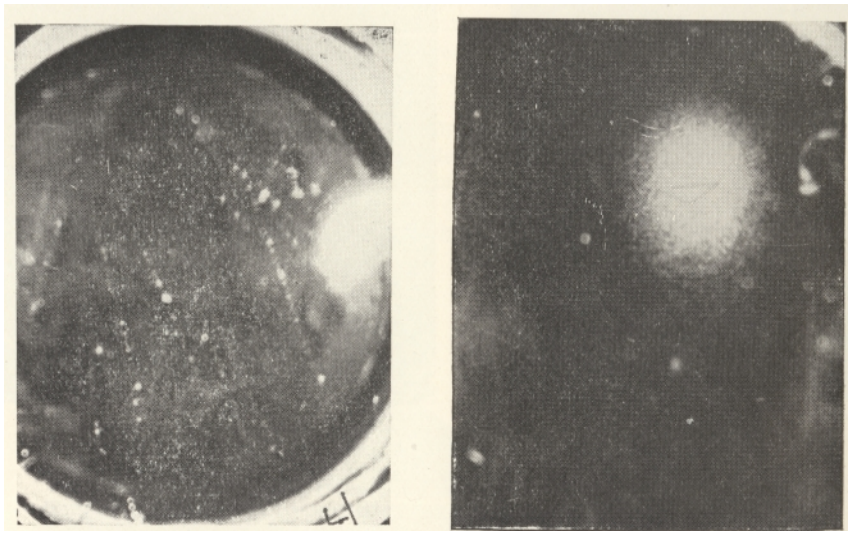
Paris, le 12 novembre 1933.

PLANCHE I

A

Aspect habituel d'une trajectoire de rayons cosmiques dans l'appareil de Wilson.

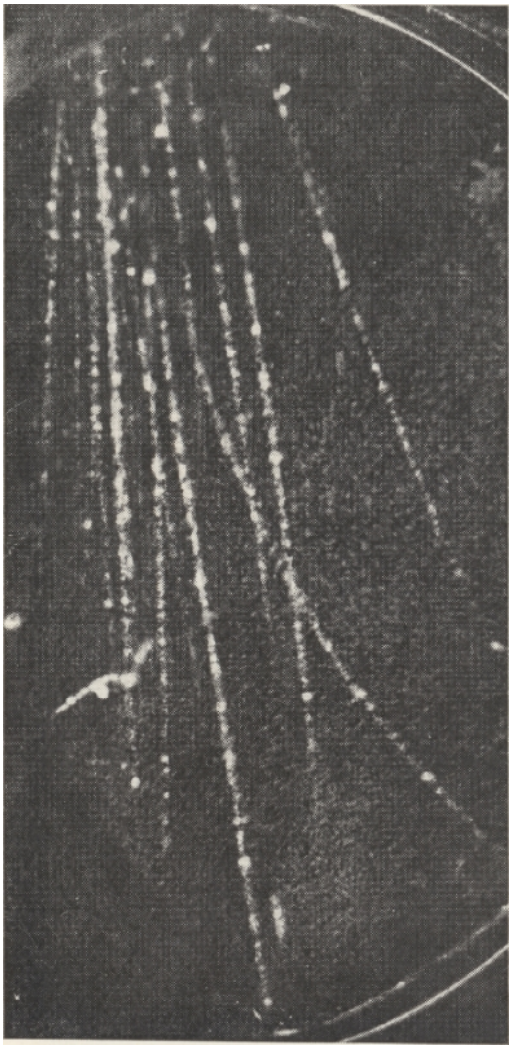
Les trajectoires sont fines et tout à fait rectilignes en ggénéral chambre de 11 cm. de diamètre, remplie d'argon à la pression atmosphérique.



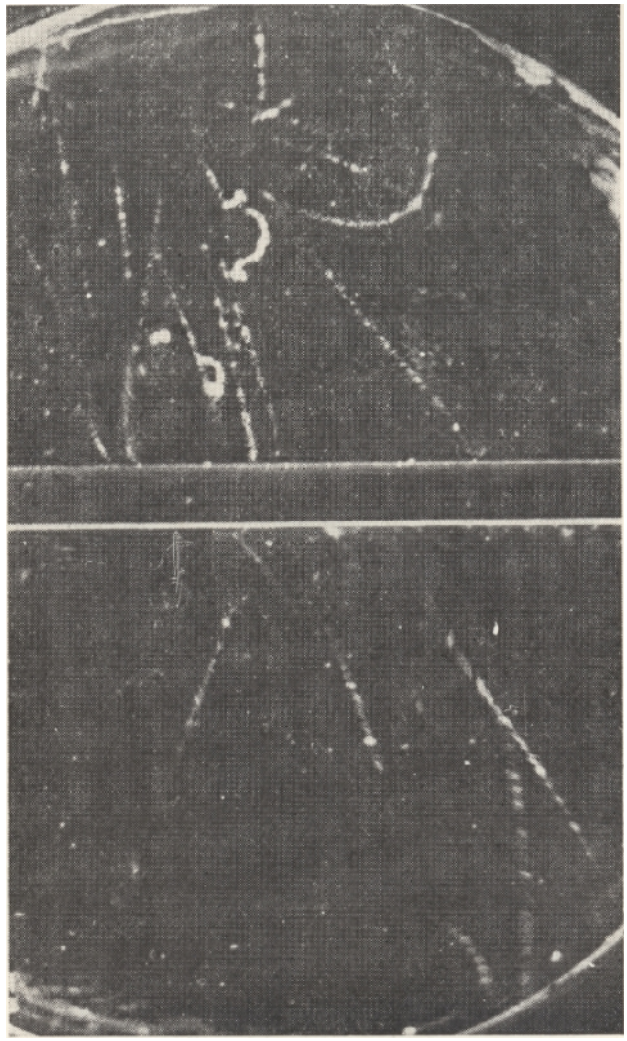
B **C**

B. — Gerbe produite par les rayons cosmiques (méthode de Blackeltt – Occhialini). Clichés de M. De Broglie et L. Leprince-Ringuet. On voit quinze trajectories d'électrons rapides et un amas. Les trajectories ne proviennent pas d'un meme point mais de cinq points. L'appareil est commandé par les impulsions de trios compteurs don't les axes ne sont pas coplanaires. Une masse de fer placée au-dessus des compteurs a sans doute été à l'origine de la gerbe	C – Il apparait aussi, parfois des boules de brouillard, correspondent à une grande quantité d'ions produits au meme point du gaz de la chamber. Celle que l'on voit a plus de 2 cm de diameter reel et est parfaitement symétrique. Certains de ces amas sont dus a des contaminations radioactive.

PLANCHE II



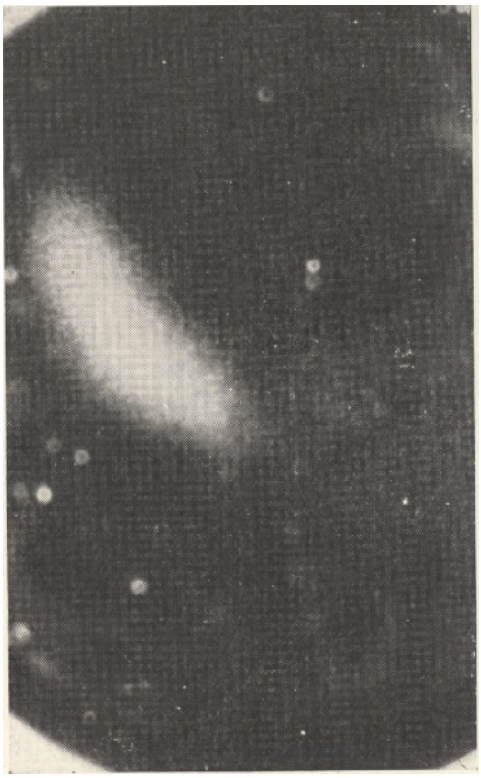
D



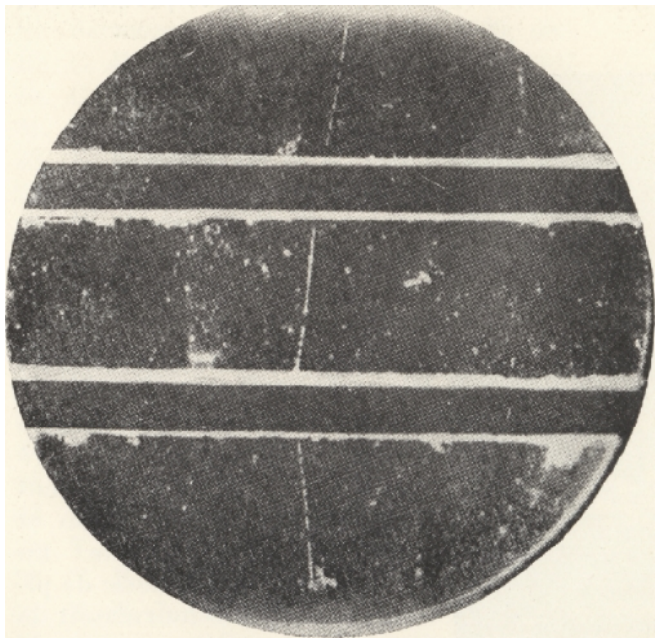
E

Blackett et Occhialini gerbes de rayons cosmiques. Ces magnifiques photographies sont parmi les premières obtenues par les auteurs. Un champ magnétique de 3 000 gauss courbe les électrons, dans l'un ou dans l'autre sens, suivant leur signe. L'on voit des trajectoires d'électrons positifs et d'électrons négatifs. Sur le cliché de droite, une lame de quelques millimètres de cuivre se trouve placée transversalement dans l'intérieur de la chambre. Les particules sont freinées par leur passage à travers cette lame. Des gerbes prennent naissance dans la lame. On ne connaît pas encore non plus leur caractère spontané.

PLANCHE III



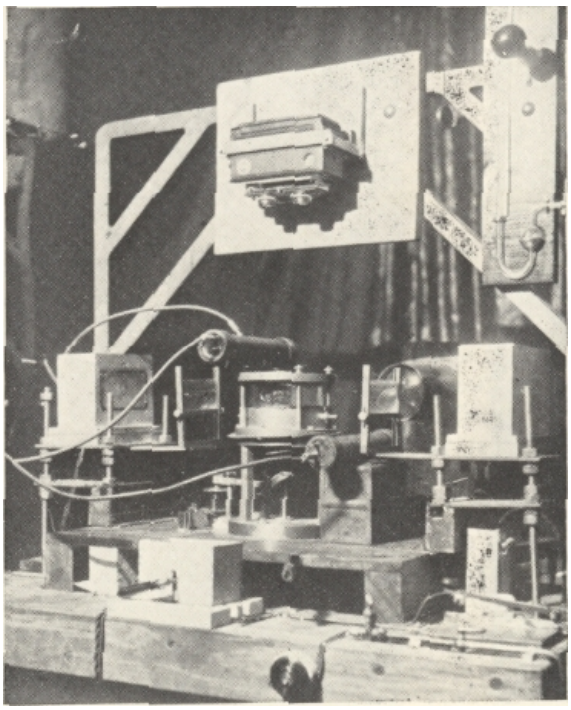
F

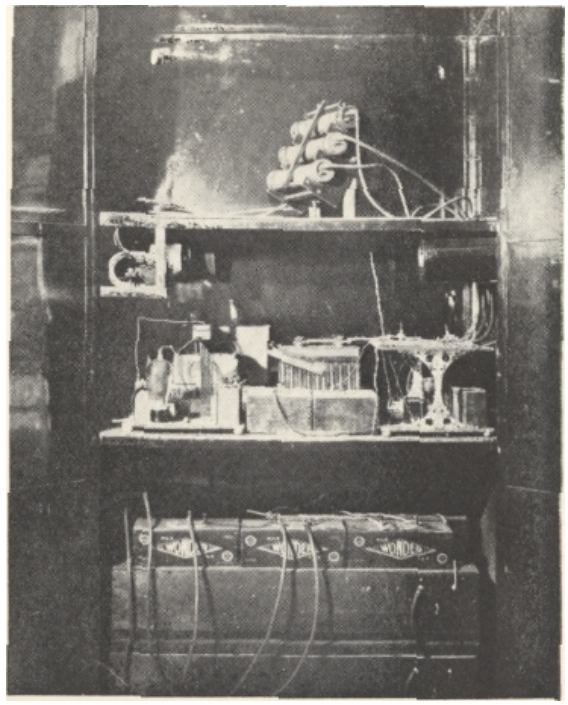


G

Ce cliché montre une grosse masse d'ions produits dans l'argon : la longueur de cette trajectoire est de 4.5 cm et l'épaisseur de 2 cm environ. Il est possible que ce soit un noyau de recul d'argon projeté par un neutron du rayonnement cosmique, mais d'autres hypothèses sont aussi émises. On remarque un rayon fin s'échappant de la grosse trajectoire ou aboutissant à elle.	Electron du rayonnement cosmique d'une énergie de 240 millions de volts. Il est à peine courbé par un champ magnétique de 15 000 gauss. Il traverse successivement deux plaques de plomb de 11 mm placées dans la même chambre, et perd 20 millions de volts au cours de la traversée supérieure, 60 millions de volts au cours de l'autre.
Cliché de M. de Broglie et L. Leprince-Ringuet.	Cliché de C. D. Anderson.

PLANCHE IV





Appareil de Wilson déclenché par les impulsions de deux compteurs à électrons. On voit les deux compteurs placés en oblique par rapport à la chambre. Les dispositifs de sélection des coïncidences et le relai à vapeur de mercure commandant la détente sont enfermés dans une armoire métallique à gauche du cliché.	Dispositif permettant l'enregistrement du passage des rayons cosmiques par coïncidence entre les impulsions de trois compteurs à axes parallèles et coplanétaires. Cet appareil a été utilisé par P. Auger et nous-mêmes pour l'étude du rayonnement cosmique sous diverses latitudes en 1933. On voit en haut trois compteurs, au milieu le dispositif de sélection (à droite) et d'enregistrement (à gauche) par thyratron et compteur téléphonique. En bas se trouve la batterie de piles sèches qui fournissait la tension de 1500 volts nécessaire au fonctionnement des compteurs. Un oscillographe Dubois permettait le contrôle des impulsions.

Bibliographie

1. HESS, ~ Ph ys. Zeit., 12, 1911, 988 13, 1912, 1084. ,
2. KOLHÖRSTER, Phys. Zeit., 14, 1913, 1066 et 1153.
3. C. T. R. WILSON, Proc. Camb. Phil. Soc., 11, 1900, 32.
4. C. T. R. WILSON, Proc. Roy. Soc., 68, 1901, 151.
5. C. T. R. WILSON, Proc. Ro . Soc., 69, 1901, 277.
6. MILLIKAN et CAMERONι ~ Phys. Rev., 28, 1926, 851 • 31, 1928, 921.
ι
7. STΣINKE> Zeit. Phυsik> 48, 1928, 647.
8. J. H. JEANS, Nature, 127, 1931, 594.
9. MILLIKAN et ANDERSoN, Phys. Rev., 40, 1932, 873.
10. KLEIN et N I S H I N A ι Zeit. Physik, 52, 1929, 853.
11. L. MEITNER et H. HUPΣELD, Zeit. PhYsik, 75, 1932, 705.
12. STRINKE et SCHINDLER, Natuιwiss., 26, 1932, 491.
13. J. W. BRoχoN, . Phvs. Rev., 42, 1932, 321.
14. A. H. CoMPTON, BENNET et STEARNS, Phys. Reυ., 39, 1932, 873.
15. BLACKE'I°I' et OecHInLINIι Nature, 130, 1932, 3279.
16. BLACKE;rr et OccHIALINI, Proc. Roυ. Soc., 139, A, 1933, 699.
17. P. AUGER et SKOBELZYNI, ComPtes-Rendus, 189, 1929, 55.
18. SKOBELZYλ', Zeit. Physik, 54, 1929, 686.
19. C. D. ANDERSON, Phys., Rev., 41, 1932, 405.
20. C. D. Anderson, Phys. Rev., 43, 1933, 368.
21. C. D. ANDERSON, PhYs. Rev., 43, 1933, 491.
22. E. RUTHERFORD et H. GEIGER, Proc. Roy. Soc., A, 81, 1908, 141.
23. H. GEIGER et MÜLLF.R, Ph3's. Zeit., 30, 1929, 489.
24. H. GEIGER et 0. KLEMPERER, Zeit. Physik, 49, 1928, 753.
25. BoTHE et KoLHόRSTER, Zeit. Phy , sik. 56, 1929, 751.
26. B. Rossi, Zeit. Physik, 68, 1931, 64.
27. B. Rossi, La Ricerca scienti , . 3, n° 7, 1932.
28. B. Rossi, Naturwiss., 20, 1932, 668.
29. MOIE-SMITH, Phys. Rev., 39, 1932, 403.
30. KUNZE, Zeit. Physik, 80, 1933, 559.
31. BERNARDINI, Nature, 129, 1932, 578.
32. 1OHNSON, Phys. Rev., 43, 1933, 307.
33. T. H. JOHNSON, Bull. Am. Ph. Soc., 11 avril 1933.
34. T. H. JOHNSON, Phys. Rev., 43, 1933, 1059/1.
35. T. H. JOHNSON, Phys. Rev., 43, 1933, 834.
36. I. H. JOHNSON et E. STEVENSON, Phys. Rev , 44, 1933, 125.
37. STEARNS et BENNET, Phys. Rev., 43, 1933, 1038.
38. J. CLAY, Proc. A. Ac. Amsterdam, 35, 1932, 1282.
39. E. REGENER, Zeit. Physik, 74, 1932, 433.
40. E. REGENEβ, Naturwiss., 20, 1932, 696.
41. E. REGENER, Phys. Zeit., 8, 34, 1933, 306.
42. A. PICCARD et M. CosYNS. Comητes-Rendus, 195, 1932, 604.
43. I. S. BOWEN et R. A. MILLIBAN, Phυs. Rev., 43, 1933, 695.

44. H. KULENKAM.PFF, Phys. Zeit., 30, 1929, 777.
45. HEISENBCRG, A nn. Phys., 13, 1932, 430.
46. E. STORMER› Naturwiss., 17, P. 643.
47. E. STORMER, Zeit. f. AstroPhysik, 1, 1930, 237 ^ 3, 1931, 31.
48. LEMAITβE et VALLARTA, P1τys. Rev., 43, 1933, 87.
49. W. SWANN, Jour. Frank. Inst, . 214, 1932, 465.
50. F. BEHOUNEK, Terr. Mαgnetism, 34, 1929, 173.
51. R. A. MILLIKAN, Phys. Rev., 36, 1930, 1595.
52. W. BOTHE et KOLHORSTER, Berl. Ber. S., 450, 130.
53. J. CLAY et H. BERLAGE, Naturwiss., 20, 1932, 687.
54. J. CLAY, Proc. R. Ac. Amsterdam, 31, 1928, 1091.
55. .1. C L A Y , Proc. R. Ac. Amsterdam, 33, 1930, 711.
56. A. H. COMPTON, Phys. Rev., 41, 1932, 111 et 681.
57. BENNET, etc., Phys. Rev., 42, 1932, 446.
58. A. H. COMPTON, Nature, 131, 1933, 713.
59. G. HOFFMANN et S. PFORTE, Phys. Zeit., 31, 1930, 348.
60. A. H. COMPTON+ Phys. Reu., 43, 1933, 387.
61. B. Rossi, Phys. Zeit., 33, 1932, 304.
62. D. SKOBELZYN, Comptes Rendus, 194, 1932, 118.
63. A. DAUVILLIER+ Comptes Rendus, 193, 1931, 348.
64. A. DAUVILLIER, Comptes Rendus, 194, 1932, 192.
65. A. DAUVILLIER, Comptes Rendus, 193, 1931, 146.
66. R. A. MIL L I K A N , Phys. Rev., 36, 1930, 1595.
67. C. T. R. WILSON, Proc. Comb. Phil. Soc., 22, 1924, 534.
68. C. T. R. WILSON, Proc. Phys. Soc., 37, 1925, 32.
69. J. CLAY, Proc. R. Ac. Amsterdam., 36, 1, P. 62, 1933.
70. E. REGENER, Zeit. Physik, 80, 1933, 666.
71. E. REGENER, Proc. Roy. Soc., 132, 1931, 335.
72. EDDINGTON, The exPandin9 Universe, Camb. Un. Press, 1933.
73. LEMAÎTRE, Nature, 128, 1931, 704.
74. L. LEPRINCE-RINGUET, Les transmutations artificielles, 1933, Hermann, édit. Paris.
75. P. AUGER et L. LEPRINCE-RINGUET, Comptes Rendus, 13 nov. 1933.
76. E. REGENER, Nature, 132, 1933, 697.
77. H. FISRMI et B. Rossτ, Accad. Lincei, 17, 1933, 346.
78. R. A. MILLIKAN, Congrès intern. élec., Paris, 1932, lm Session, raPPort 5.
79. BOWEN, Phys. Rev., 41, 1932, 24.
80. B. Rossτ+ Nυovo Cimento, 8 mars 1931.
81. I. Curie et F. JOLIOT, Journ. de Phys., IV, VII 1933, 492. ,
82. T. H. JOHNSONι „ Phys. Rev.ι 44, 1933, 856.
83. E. STEVENSON, Phys. Rev., 44, 1933, 855.
84. A. EHMF.RT, Phys. Zeit., 35, 1, 1933, 20.
85. L. CURTISS, Bur. of Standards, J. of Res.„ 9 1932, 815.
86. E. REGENER, Nature, 132, 1933, 696.
87. A. CORLIN, Nature, 133, 1934, 63.
88. A. DAUVILLIER, ComPtes Rendus, 26 déc. 1933, P. 1741.
89. C. D. ANDF.RS ~ oN, Phys. Rev., 44, 1933 , 406.
90. Rossi, Na.ture, 132, 1933, 173.
91. V. HEISS et R. STEINMAIΠiER, Nature, 132, 1933, 601.
92. B. Rossτ, Lα Ricerca Scient., II, 1933, 10.
93. H. HOERL1N, Nature, 132, 1933, 61.
94. J. A. PRINS, Nature, 132, 1933, 781.

95. E. J. WILLIAMS, Nature, 1.31, 1933, 485.
96. H. ALFVEN, Nature, 131, 1933, 620.
97. M. S. VALLARTA, Phys. Rev. 44, 1933, 1.
98. J. H. SAωYER, Ptcys. Rm, 44, 1933, 241.
99. E. FÜNFER, Zeit. f. Phys., 83, 1-2, 1933, 92.
100 KUNZE Zeit. f. Phηqs.f 83, 1-2, 1933, 1.
101. P. COUDERC, Discussion sur l'évolution de l'Univers, Paris s, Gauthier-Villars, 1933.
102 MESSERSCHMIDT ~ Phys. Zeit., 34, 1933, 896.
103 Gordon LOCHER, Phys. Rev., 44, 1933, 15 novembre.
104. P. AUGER et L. LEPRINCE-RINGUET, Nature, 133, 138, 27 .J'αΣηv' er 1934.
105. P. AUGER et G. MONOD-HERZEN) Comptes Rendus, 197, 1406, 1933.
Le lecteur consultera avec fruit 1'exposé schématique de M. Pierre Auger sur l'état actuel du Problème dans le Journal de Physique janvier 1934.

Le lecteur trouvera dans un article de Hoffmann Physikalische Zeitschri t 33, H. 17, 1932, p. 633) une documentation bibliographique complète avant juin 1932.

Table des Matières

Pages
AVANT-PROPOS DE M. MAURICE DE BROGLIE 3
INTRODUCI'ION 5

PREMIÈRE PARTIE
Résultats acquis avant 1930 7
Théorie (le Millikan 8
Récentes modifications 10
Méthode de la chambre d'ionisation 11
Méthodes nouvelles 13
Utilisation de la méthode de Wilson 14
Méthode des coïncidences 16
Absorption de nombre 19

DEUXIÈME PARTIE
Energie du rayonnement .....
Energie et direction .....
Courbes d'ionisation dans l'atmosphère .....
La courbe de Regener .....
Interprétations possibles de la courbe de Regener .....
Effet de latitude .....
Propriétés du rayonnement cosmique .....
Transmutations par les rayons cosmiques .....
Expériences d'Anderson .....
Expériences de Blackett et Occhialini .....
NOTE SUR LA NATURE DES RAYONNEMENTS ULTRAPENETRANTS
NOTE SUR UN TRAVAIL RÉCENT .....
BIBLIOGRAPHIE .....