



**HAL**  
open science

## Recherches sur les rayons cosmiques, effectuées au Scoresby Sund pendant l'année polaire

M.A. Dauvillier

► **To cite this version:**

M.A. Dauvillier. Recherches sur les rayons cosmiques, effectuées au Scoresby Sund pendant l'année polaire. *Journal de Physique et le Radium*, 1934, 5 (12), pp.640-648. 10.1051/jphys-rad:01934005012064000 . jpa-00233289

**HAL Id: jpa-00233289**

**<https://hal.science/jpa-00233289>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# RECHERCHES SUR LES RAYONS COSMIQUES, EFFECTUÉES AU SCORESBY SUND PENDANT L'ANNÉE POLAIRE

Par M. A. DAUVILLIER.

**Sommaire.** — L'auteur souligne l'importance des mesures de rayons cosmiques dans les régions polaires. Ces mesures n'avaient, jusqu'ici, fourni que des résultats incertains par suite de leur manque de continuité. La méthode statistique est seule susceptible, à cause des fluctuations inévitables d'un rayonnement de grand quantum et de faible intensité, de donner, dans ce domaine, des résultats précis.

L'auteur décrit les appareils utilisés. Toutes les mesures ont été effectuées avec deux types différents d'appareils. L'intensité absolue des rayons cosmiques est, au Scoresby Sund, notablement plus élevée que sous nos latitudes, ce qui indique une extension de l'effet géomagnétique.

Les divers appareils, blindés ou non, utilisés dans des lieux radioactifs ou non, ont montré un important effet barométrique, ayant permis la mesure du coefficient d'absorption de l'air des rayons filtrés ou non. Le pouvoir de pénétration au niveau de la mer a été trouvé être le même que sous nos latitudes.

La mesure de l'absorption du rayonnement pur dans le zinc pur a donné, par comparaison directe avec l'effet barométrique, le même coefficient d'absorption massique. L'auteur discute ce résultat.

L'auteur a étudié les fluctuations du rayonnement et « l'activité » durant la plus grande partie de l'Année polaire. Ces variations sont comparées à celles de l'activité aurorale et magnétique et à l'activité solaire. L'auteur discute la signification de ces résultats par rapport à la théorie de l'origine de ces rayons précédemment exposés.

**Introduction.** — L'étude des rayons cosmiques — comme celle des autres phénomènes géophysiques associés au champ magnétique terrestre (aurores, ozone, etc.) — est particulièrement importante dans les régions polaires. Avant l'Année polaire, elle n'y avait été entreprise qu'en de rares occasions, avec des résultats incertains. En 1928, durant les voyages polaires du dirigeable « Italia », F. Béhounek <sup>(1)</sup> employant un appareil de Wulf-Kolhörster encore imparfait, trouva un coefficient d'absorption dans l'air (0 — 1 km) égal à  $\frac{\mu}{\rho} = 0,016 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ , égal à la moitié seulement de celui des rayons  $\gamma$  du radium C et une ionisation de  $\mathcal{J} = 0,4$  paire d'ions par  $\text{cm}^3$  d'air normal et par seconde, sur le « pack », 7 fois plus faible que la valeur normale. Ces mesures montrèrent toutefois l'absence d'un rayonnement cosmique important dans la région du pôle de Gauss.

En 1929, A. Corlin <sup>(2)</sup>, utilisant un appareil analogue, observa le long des côtes de Norvège, entre 55° et 70° de latitude nord, une diminution de l'intensité des rayons cosmiques atteignant 10 pour 100. Contrairement à ce résultat, W. Bothe et W. Kolhörster <sup>(3)</sup> ne trouvèrent en 1930, aucune différence à 5 pour 100 près, au cours de la croisière annuelle du « Resolute », de Hamburg, au Spitzberg (Latitude géomagnétique 53 à 77°). Ils utilisaient trois appareils de Wulf-Kolhörster, dont deux blindés (10 cm Pb), ainsi que deux compteurs de Geiger-Müller à enregistrement automatique.

Il était indiqué de profiter de l'Année Polaire Internationale 1932-1933, pour poursuivre et étendre ces recherches. Durant le voyage et le séjour de l'Expédition française au Scoresby Sund, sur la côte orien-

tale de Grönland (latitude géomagnétique <sup>(1)</sup> 76° N), j'ai effectué des mesures continues de l'intensité moyenne, des coefficients d'absorption dans l'air et le zinc, ainsi que des mesures absolues.

**Appareils.** — Il est très important, pour la mesure correcte des rayons cosmiques, d'utiliser simultanément plusieurs appareils de types différents. Afin de pouvoir comparer les mesures à celles déjà effectuées en Europe, j'ai utilisé l'appareil absolu de Wulf-Kolhörster, et deux variomètres.

Le premier fut étalonné à Postdam dans le Höhensstrahlungs laboratorium du professeur W. Kolhörster, auquel j'exprime mes remerciements pour l'envoi d'un de ses propres appareils.

**L'Appareil de Kolhörster.** — Comme on le sait <sup>(2)</sup>, cet appareil consiste en une chambre d'ionisation cylindrique étanche, de volume  $V$  (N° 5502:  $V = 4130 \text{ cm}^3$ ) construite en fer de 2,5 mm d'épaisseur. Ce récipient, galvanisé intérieurement, renferme un électromètre de Kolhörster constitué par deux boucles en fil de quartz métallisées. Ces boucles sont montées sur un support en quartz, fixé sur l'objectif d'un microscope étanche, muni d'un micromètre oculaire, traversant le couvercle. Cet électromètre, indépendant de la température, est, en principe, analogue à celui de P. Villard <sup>(1)</sup>. Sa capacité est faible ( $C = 0,404 \text{ cm}$ ) et l'étendue de mesure (280 V) largement suffisante pour assurer la saturation ( $> 100 \text{ V}$ ). L'échelle, sensiblement linéaire dans la région utile, correspond à une sensibilité de 1,74 V/d. Le récipient est rempli d'air filtré, desséché par du sodium, sous une pression voisine de celle de l'atmosphère. La lecture de la pression intérieure  $p$  (baromètre compensé), et de la température  $t$  du ré-

<sup>(1)</sup> BÉHOUNEK. *Terr. Magn. and Atm. Electr.*, t. 34, p. 173 (Sept 1929)

<sup>(2)</sup> A. CORLIN, *Arch. f. Mat. Astr. o Fysik.*, 1930, t. 22, p. 1.

<sup>(3)</sup> *Sitz. d. Preus. Akad. d. Wiss.* 1930, t. 26, p. 1-9.

<sup>(1)</sup> Nous désignerons sous ce nom la latitude rapportée au pôle de Gauss pour la distinguer de la latitude magnétique usuelle

<sup>(2)</sup> *Physik Z.*, 1926, t. 27, p. 62-63.

<sup>(3)</sup> P. VILLARD, *Le Radium*, 1916, t. 8, p. 469.

cipient, permettant le contrôle de l'étanchéité et de la constance de la densité  $\rho$  ( $\rho = 0,001209$ ). Le volume d'air normal  $V_0$  ( $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $p = 760$  mm Hg) est égal à :

$$V_0 = V \frac{p}{760(1 + \alpha t)} + V \times \frac{0,001209}{0,001293} = 3861 \text{ cm}^3.$$

Le système central isolé est chargé (positivement) au moyen d'une électrode isolée portée par un rodage. Si la chute de tension horaire est  $dV$  volts, le nombre de paires d'ions produites par centimètre cube d'air normal et par seconde est :

$$J = \frac{c dV}{300eV_0 3600} = K dV \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}.$$

$e$  étant la charge élémentaire : ( $4,78 \cdot 10^{-10}$  U. E. S.).

L'activité propre (rayons  $\alpha$ ) de cet appareil, mesurée à 406 m de profondeur dans la mine de sel de Berlepschschacht à Stassfurt, avec un blindage de plomb de 9 cm arrêtant le rayonnement  $\gamma$  du potassium ( $< 0,5$  pour 100 K), était de  $J_0 = 1,65$  I (<sup>1</sup>). A Postdam, avec un blindage de 10 cm de Pb, l'intensité des rayons cosmiques est de :  $J = 1,60$  I égale à l'activité propre, constante, de l'appareil. Le courant total correspondant est de :  $i = c dV = 0,44 \cdot 10^{-12} \times 4,4 \cdot 10^{-3} = 1,8 \cdot 10^{-15}$  A. La constante d'Eve pour le rayonnement  $\gamma$  non filtré du RaC est pour cet appareil :  $5,7 \cdot 10^9$ .

L'appareil peut être immergé dans l'eau jusqu'à la profondeur de 10 m. Il est, en outre, muni d'un dispositif enregistreur photographique fonctionnant 24 heures. Je l'ai surtout utilisé pour des mesures visuelles horaires, plus précises. Chaque mesure comporte quatre lectures portant sur environ 60 divisions, lues à 1/10 près. L'erreur relative à la durée de la mesure (1 h) est du même ordre, si bien que l'on peut estimer à précision totale à 1 pour 100.

Cet instrument fut utilisé sans blindage. Toutefois, dans le laboratoire, il était disposé sur une table de zinc de 30 cm de diamètre et de 10 cm d'épaisseur, le protégeant contre une partie des rayons  $\gamma$  issus du sol. Il fut également utilisé dans une grotte de neige inactive et sur un glacier.

**Variomètre intégrateur.** — Les deux autres instruments ou « variomètres » étaient l'un, un appareil intégrateur permettant la mesure de l'intensité moyenne pendant 12 heures, l'autre un enregistreur à marche continue. Le premier qui est représenté sur la figure 1, a déjà été brièvement décrit (<sup>2</sup>). Le principe de sa construction réside dans la combinaison d'une chambre d'ionisation à haute pression (100 atm.) remplie d'argon pur avec un électromètre fonctionnant dans le vide. Le gaz monoatomique doit être assez pur pour que les électrons formés y demeurent libres (<sup>3</sup>) et que le courant de saturation soit ainsi obtenu avec une faible

différence de potentiel, malgré la pression élevée. L'électromètre doit être placé dans le vide afin d'éviter l'ionisation parasite due aux rayons  $\alpha$ . Sur la figure 1, 1 est la chambre d'ionisation, consistant en un cylindre ( $l = 30$  cm,  $d = 10$  cm) en duralumin de un centimètre d'épaisseur, timbré à 225 kg/cm<sup>2</sup>. Ce récipient, d'un

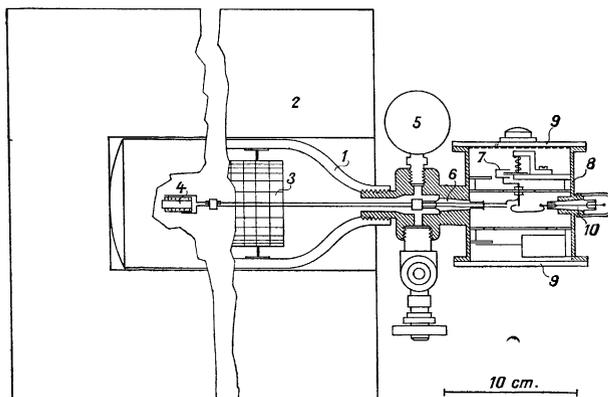


Fig. 1.

volume intérieur de 2 litres, ne pèse que 2 kg, ce qui rend l'appareil aisément transportable. Il peut être introduit dans un blindage en zinc pur, 2, de 10 cm d'épaisseur, consistant en un cylindre de 50 cm de longueur et de 30 cm de diamètre, pesant 236 Kg et titrant 99,97 pour 100 Zn. Ces blindages, fournis par la Société de la Vieille Montagne, étant constitués d'un métal distillé et purifié électrolytiquement, sont remarquablement privés d'impuretés radioactives. Ils ne laissent passer qu'environ 1 pour 100 des rayons  $\gamma$  du RaC. Les blindages sont munis d'un collier de fer et d'anneaux en facilitant la manutention.

Dans le but de diminuer l'ionisation parasite due aux rayons  $\alpha$ , le récipient 1 contient une grille cylindrique 3 à larges mailles ( $r = 3$  cm), selon le principe de N. R. Campbell (<sup>1</sup>). Cette électrode est constituée par une mince tôle d'acier largement perforée et galvanisée qui, enroulée sur elle-même, peut être introduite dans le cylindre.

Les deux chambres d'ionisation utilisées au Scoresby Sund avaient été remplies gracieusement par la Société « L'Air liquide » (<sup>2</sup>) d'argon pur et sec, sous la pression de cent atmosphères (400 litres). Ce gaz, d'une densité de 1,379, ne contenait que 3/1000 d'azote et 1/50.000 d'oxygène. Néanmoins cette proportion d'un gaz électronégatif s'est révélée encore trop grande et la saturation n'était pas atteinte. La courbe ionisation-pression indique (voir fig. 2) que le courant sous cent atmosphères aurait dû être 9 fois plus intense que le courant observé. Ceci montre la nécessité absolue de purification *in situ* du gaz par le calcium chauffé (Soddy). Aussi les chambres ont-elles été remontées depuis avec

(<sup>1</sup>) Nous désignerons par le symbole  $I$  une paire d'ions produite dans 1 cm<sup>3</sup> d'air normal en 1 seconde.

(<sup>2</sup>) A. DAUVILLIER, *Rev. Gen. Electr.*, t. 31, 9 avril 1932.

(<sup>3</sup>) M. LAPORTE, *Bull. Soc. franç. Phys*, 18 février 1927.

(<sup>1</sup>) N. R. CAMPBELL, *Le Radium*, t. 3, p. 33, février 1906.

(<sup>2</sup>) J'exprime mes vifs remerciements à M. G. Claude, pour ce travail sans lequel les mesures n'auraient pas été possibles.

un petit four à calcium, 4, du modèle construit par M. Dunoyer. Un manomètre, 5, permet le contrôle de la pression et de l'étanchéité.

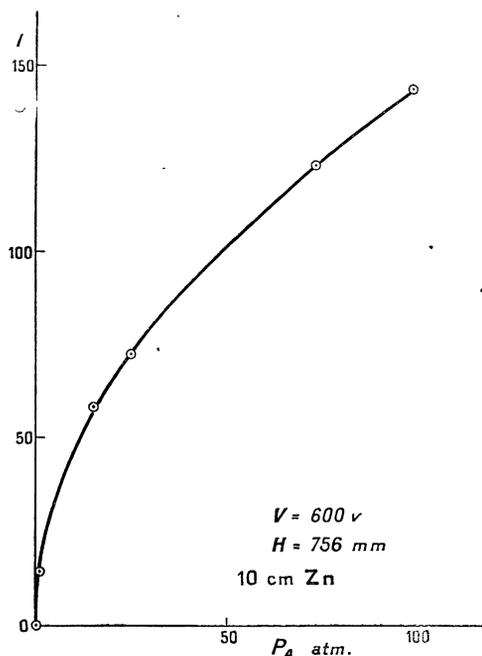


Fig. 2.

Cette électrode axiale est portée par un bouchon rodé en pyrex-silice, 6, scellé à la picéine, ainsi que tous les autres joints et filetages. L'électromètre de Szilard (1) 7, à aiguille, est contenu dans le carter 8 évacué, obturé par les glaces en pyrex 9. La capacité de la chambre d'ionisation est de 8 cm et celle de l'électromètre 2 cm. La chute de tension utilisée était lue sur une région sensiblement linéaire de l'échelle (750-500 volts). Le champ était donc voisin de 200 V/cm. Une décharge en 12 heures correspondait à un débit moyen de  $i = 4.10^{-14}$  A, soit à un parcours de l'aiguille de 15° mesurable à 1 pour 100 près par lecture directe. Les petites imperfections des pivots de ces électromètres ne permettent pas une plus grande approximation.

Comme il aurait été difficile de conserver dans le carter une pression assez basse pour éviter toute effluve (qui se traduit par une décharge instantanée), celui-ci était rempli d'hydrogène sec sous une pression de l'ordre du centimètre de mercure. Un baromètre 9 contrôle l'étanchéité. Enfin, une traversée 10, à bouchon de silice, permet la charge du système isolé par contact (magnétique) ou par induction. Un bouchon analogue en pyrex sert de becquet.

Cet appareil donna toute satisfaction : son « zéro » est considérablement plus faible que celui de l'appareil de Kolhörster. Apprécié en faisant le vide dans la

(1) B. SZILARD, *C. R. mars 1913*, 456, p. 779.

chambre, il ne dépassait pas 5 pour 100 du courant d'ionisation observé sous blindage.

**Enregistreur.** — L'appareil enregistreur comporte une chambre d'ionisation identique portée à un potentiel constant. L'électrode axiale, protégée par un anneau de garde au sol, est reliée à un électromètre sensible et à une fuite constante. J'ai utilisé une combinaison du montage classique de Allen (1) qui consiste à compenser le courant à mesurer par un courant d'ionisation constant produit par les rayons  $\alpha$  de l'uranium (2) et du montage potentiométrique de Swann (3) qui consiste à compenser les variations de tension de la batterie par l'influence exercée sur une capacité égale à celle de la chambre d'ionisation. Le schéma du montage est représenté sur la figure 3. Il

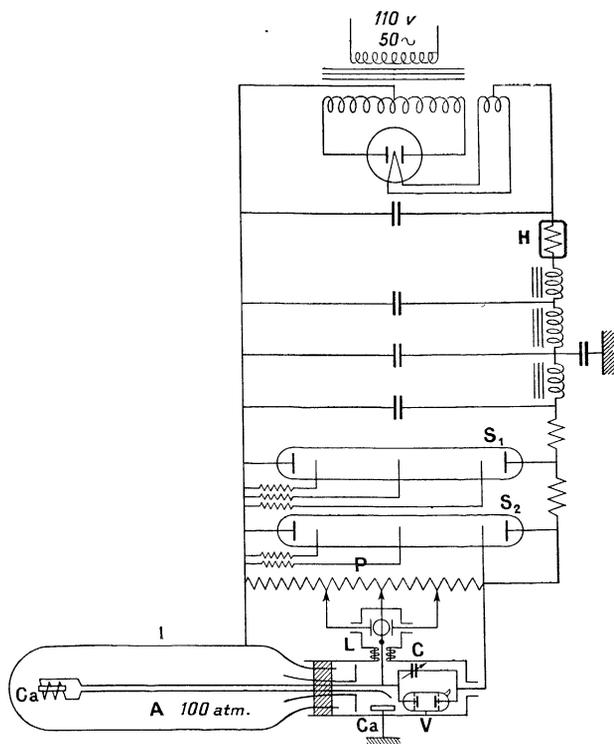


Fig. 3.

représente une alimentation totale par le courant alternatif du secteur au moyen d'une résistance en fer dans l'hydrogène H et de potentiomètres à décharge  $S_1$  et  $S_2$ . Au Scoresby Sund, le potentiomètre était alimenté par une batterie d'accumulateurs au nickel-cadmium de 900 volts et l'électromètre L était un appareil de Linde-

(1) ALLEN, *Phil. Mag.*, 1907, t. 14, p. 712.

(2) Ces résistances, scellées, sont établies sous la forme d'un petit tube de cuivre, servant d'anneau de garde, soudé à deux pieds de lampe en verre Sibor portant les électrodes (La « Verrière Scientifique »); l'une d'elles est recouverte d'un dépôt de  $U_3O_8$  (20 mg/cm<sup>2</sup>) ou mieux, d'uranium. Le débit est réglé par la pression du gaz.

(3) SWANN, *Phys. Rev.*, 1921, 9, p. 240.

mann prévu pour un enregistrement photographique à noircissement direct.

Malheureusement, cet électromètre présenta, pour une cause non élucidée (1), un zéro instable et j'essayais en vain d'y substituer une lampe électromètre. En raison de ces difficultés, ce troisième appareil ne fut pratiquement pas utilisé pour la mesure des rayons cosmiques.

Les appareils étaient disposés, dans le laboratoire édifié en bois (double paroi de 6 cm d'épaisseur ; plafond et toiture : triple paroi de 9 cm d'épaisseur ; couverture de papier goudronné), sur la roche en place, sur des massifs en maçonnerie (50×50×50 cm) affleurant le plancher. Le bâtiment était parfaitement transparent au rayonnement cosmique, mais le sol, constitué de gneiss rose, était assez radioactif. Les mesures effectuées avec la chambre à haute pression, nue et blindée, accusèrent une intensité de rayons  $\gamma$  égale à 80 pour 100 de l'intensité des rayons cosmiques. Les mesures, plus indirectes, effectuées avec l'appareil de Kolhörster, indiquèrent une intensité de rayons  $\gamma$  égale à 30 pour 100 de celle des rayons cosmiques. On voit que la sensibilité spectrale des deux appareils était très différente, le gaz lourd comprimé absorbant relativement davantage les « rayons » absorbables (2).

Les premières mesures consistèrent à comparer les indications données par les deux appareils disposés au voisinage l'un de l'autre, durant le même temps. Celles-ci étaient, en général, proportionnelles. Toutefois certaines valeurs, s'écartèrent notablement des autres. Ce phénomène est aujourd'hui explicable par la considération des « gerbes » découvertes par Anderson avec la chambre de Wilson.

L'altitude du laboratoire étant de 40 m au-dessus du niveau de la mer, correspondant à une dépression de 4 mm de mercure, les valeurs données pour la pression normale ( $H = 760$  mm) sont celles relatives à la pression de 756 mm de mercure. La pression était mesurée au moyen d'un baromètre de précision Paulin.

**Résultats. — Effet de latitude.** — Les latitudes géomagnétiques de Brest et du Scoresby Sund variant de 51° à 76° N (méridien géomagnétique), il aurait été intéressant d'effectuer des mesures continues précises sur ce trajet. Malheureusement, l'encombrement du mouilleur de mines « Pollux » et l'état de la mer (3) rendirent ces mesures difficiles. Elles furent exécutées avec l'appareil de Kolhörster et le variomètre disposés dans une cabine du pont supérieur. L'activité du navire

(3 000 *t*) étant notable (l'intensité du rayonnement  $\gamma$  était égale à 46 pour 100 de celle des rayons cosmiques), le variomètre fut utilisé dans son blindage.

Les deux appareils accusèrent entre 63° et 76° une intensité constante, à  $\pm 3$  pour 100 près (14 mesures). Cependant, un faible effet de latitude (s'il existe dans ces régions du globe), ne saurait être prouvé, même avec un enregistrement précis, par une seule série de mesures, mais seulement par une statistique portant sur de longues périodes de temps effectuée en diverses stations, afin d'éliminer les fluctuations. Or, les valeurs de l'intensité moyenne du rayonnement cosmique ayant été, dans la suite, mesurées statistiquement d'une manière précise au Scoresby Sund, il apparaît que l'intensité du rayonnement filtré est supérieur de 7 pour 100 à la valeur moyenne observée en mer.

Nous verrons, par ailleurs, que l'intensité absolue ( $H = 760$  mm) mesurée sur un glacier inactif avec l'appareil de Kolhörster nu accuse une intensité :  $J = 2,81 I$  supérieure de 14 pour 100 aux valeurs observées sous nos latitudes. ( $J = 2.0 I$ ). Les récentes mesures de Corlin (1) à Abisko (lat. géomagn. 66° N), semblent également montrer un accroissement, l'appareil de Kolhörster nu sur le Torne Träsk gelé ayant donné  $J = 2,30 I$  et l'appareil de Steinke, latéralement blindé, la valeur :  $J = 2,42 I$ . L'effet de latitude, découvert en 1927 par J. Clay, lors de ses voyages de Hollande à Java, soit une diminution de 14 pour 100, se poursuivrait donc entre nos latitudes et les régions polaires.

Ce résultat demande néanmoins à être confirmé par de nouvelles mesures effectuées avec d'autres appareils en différentes régions du Globe.

**L'effet barométrique. Coefficient d'absorption de l'air.** — L'effet barométrique, découvert en 1926 par Myssowsky et Tuwim, est le meilleur critère prouvant

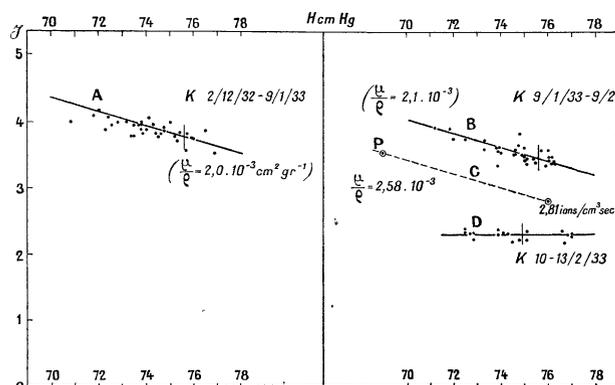


Fig. 4.

la sensibilité et le fonctionnement correct d'un appareil de mesure des rayons cosmiques. C'est le phénomène connexe de l'augmentation de l'intensité avec l'alti-

(1) A. CORLIN, *Annals of the Observatory of Lund.*, 1934, n° 4.

(1) Les mesures électrométriques continues étaient perturbées, en particulier, par notre poste d'émission à ondes courtes située à proximité, dans le même bâtiment de bois.

(2) Tout corps radioactif doit, naturellement, être proscrit dans le laboratoire et les environs. C'est ainsi qu'un réveil à cadran lumineux, introduit dans le laboratoire, doublait l'ionisation dans l'appareil de Kolhörster.

(3) Le « Pollux » étant un brise-glace, et non un véritable bâtiment de mer, roulait énormément. La lecture précise des électromètres n'était guère possible qu'aux mouillages.

tude, une variation de pression de 10 pour 100 (70 mm de mercure) correspondant à une différence d'altitude de 800 m. Grâce aux fortes dépressions fréquentes en hiver dans les régions polaires, cet effet fut particulièrement remarquable au Scoresby Sund. Il se manifesta dans toutes les séries de mesures, avec les deux types d'appareils, blindés ou non.

Les graphiques de la figure 4 représentent les effets barométriques observés avec l'appareil de Kolhörster<sup>(1)</sup> nu, dans le laboratoire, durant les mois de décembre 1932 et de janvier 1933. On voit que les droites A et B, — qui peuvent être considérées comme les tangentes à la courbe d'absorption dans l'atmosphère — accusent la même pente, soit un coefficient d'absorption apparent  $\mu/\rho = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ . On remarque qu'elles sont décalées d'environ 10 pour 100. Ce phénomène, qui fut observé simultanément avec la chambre à haute pression blindée, traduit l'ensevelissement rapide du laboratoire sous la neige au début de janvier 1933. L'angle solide de rayonnement cosmique mesuré se rétrécissait vers le zénith, le toit ayant toujours été libre de neige au-dessus des appareils. Cet effet, qui est également traduit par la courbe d'« activité cosmique » de la figure 7, rendrait vaine toute tentative de mesure de la variation annuelle.

Pour obtenir la véritable valeur du coefficient d'absorption de l'air, il est nécessaire de connaître la vraie valeur de l'intensité des rayons cosmiques, c'est-à-dire de retrancher celle des rayons  $\gamma$  parasites. Cette détermination a été faite, comme nous le verrons plus loin, sur un épais glacier bien dégagé (moyenne de 40 mesures horaires). La droite correspondante C (en trait ponctué sur la figure 4), montre une diminution de l'intensité des rayons cosmiques purs de  $10^{-2} \text{ I}$  par millimètre de mercure, soit un coefficient d'absorption égal à  $\mu/\rho = 2,58 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ gr}^{-1}$  à quelques centièmes près, en parfait accord avec le coefficient observé au niveau de la mer sous d'autres latitudes, par Kolhörster, Steinke, Büttner, Millikan, etc...

L'atmosphère constituant un étalon d'absorption émouvable la radiation cosmique arrivant au sol dans les régions polaires a donc le même pouvoir de pénétration que sous nos latitudes.

L'appareil de Kolhörster ayant été, au début de février 1933, installé dans une grotte inactive ( $1 \times 2 \times 5 \text{ m}$ ) creusée dans la neige dure ( $d = 1/2$ ) entourant le laboratoire, la basse température régnant dans celle-ci ( $-10^\circ\text{C}$ ) fit se déclarer une fuite et l'effet barométrique disparut, puisque l'ionisation y devenait proportionnelle à la pression. C'est ce que montre la droite horizontale D de la figure 4. L'ionisation est plus faible ( $H = 749 \text{ mm}$ ) que sur un sol inactif par suite de l'absorption exercée par la neige, sensiblement équivalente à 1 m d'eau.

Cet accident vérifie donc le fonctionnement correct de l'appareil. La fuite n'existant qu'aux basses tempé-

(1) Chaque point représente la moyenne de quatre mesures horaires consécutives telles que celles représentées dans la moitié supérieure de la figure 8.

ratures (effet de contraction), l'appareil put encore être utilisé dans la suite aux températures supérieures à  $0^\circ\text{C}$ .

**Coefficient d'absorption du zinc.** — Les mesures effectuées avec la chambre à haute pression confirment ces résultats et ont permis, en outre, la détermination du coefficient d'absorption des rayons cosmiques purs dans le zinc pur. Les droites A et B de la figure 5

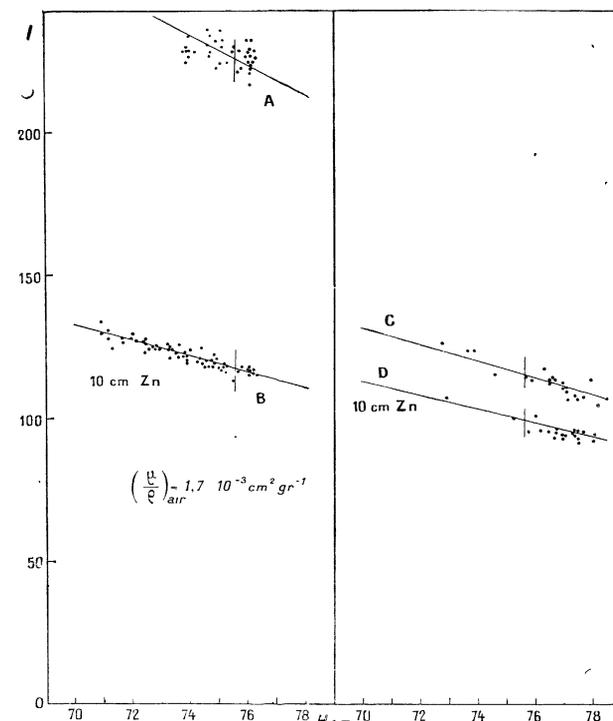


Fig. 5.

montrent les effets barométriques observés dans le laboratoire avec ou sans blindage. Le coefficient d'absorption dans l'air des rayons cosmiques filtrés par 10 cm de zinc est de :  $\mu/\rho = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ . Il est plus faible que dans le cas précédent (2,6), le rayonnement étant notablement filtré par le blindage.

Les droites C et D représentent les mêmes mesures (chambre nue et blindée) effectuées dans la grotte de neige. On voit que l'effet barométrique est toujours très accusé, mais les points expérimentaux ne sont pas assez nombreux et la pression n'a pas suffisamment varié pour permettre une mesure précise du coefficient d'absorption (celui-ci pourrait varier de 1,7 à  $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ). Aussi la droite C est-elle tracée parallèlement à la droite B. On voit que le rayonnement  $\gamma$  a complètement disparu et que l'épaisseur de neige est équivalente à 10 cm de zinc (droite C). Le décalage existant entre les droites C et D permet la comparaison directe de l'absorption dans l'air et dans le zinc. On constate ainsi qu'un centimètre de zinc est équivalent à 0,6 cm de mercure ou :  $0,6 \times 13\,596/1,293 = 6,3 \times 10^3 \text{ cm}$  d'air normal. Le rapport des densités du zinc fondu et de l'air normal étant de  $6,87/1,293 \cdot 10^{-3}$

soit  $5,3 \cdot 10^3$ , les absorptions massiques dans ces deux milieux sont donc sensiblement égales. Nous retrouvons, pour les rayons cosmiques, une loi d'absorption analogue à celle valable pour les rayons  $\beta$  et  $\gamma$ , à savoir une absorption indépendante du numéro atomique et proportionnelle à la densité de la matière traversée. Le coefficient d'absorption massique du zinc pour des rayons cosmiques au sol, filtrés par 1 m d'eau, est ainsi, en première approximation, égal au coefficient d'absorption précédemment obtenu pour l'air:  $\mu/\rho = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ .

Cependant, tandis que la mesure portant sur la totalité de l'atmosphère, est une mesure idéale, celle consistant à entourer une chambre d'ionisation par un écran métallique contiguë est la cause de perturbations dues au rayonnement secondaire issu du blindage. La constance du coefficient d'absorption massique dans la matière, mise en évidence par Hoffmann en 1926, signifierait que le noyau atomique ne joue aucun rôle et que l'absorption est proportionnelle à la densité électronique extra-nucléaire de la matière. En effet, l'unité de volume d'un corps simple de masse atomique  $A$  et de densité  $\rho$  contient  $N\rho/A$  atomes,  $N$  étant le nombre d'Avogadro. Chacun renfermant  $Z$  électrons, si  $Z$  est le numéro atomique, le nombre  $n$  d'électrons par  $\text{cm}^3$  sera :

$$n = \frac{N\rho Z}{A} = \frac{1}{2} N\rho = 3 \cdot 10^{23} \rho.$$

C'est-à-dire qu'il sera indépendant de la nature de la matière absorbante.

On pourrait penser que l'absorption exercée par l'atmosphère, qui paraît porter sur un rayonnement primaire (photons ou électrons d'énergie équivalente) et l'absorption exercée par un blindage proche ne peuvent être comparées. La seconde paraît beaucoup plus intéresser les gerbes d'électrons positifs et négatifs excités dans le sol, les parois et le blindage que le rayonnement primaire. Mais on sait que, pour les rayons  $\gamma$  de quantum supérieur à  $10^6$  eV, l'absorption devient nucléaire et correspond à la matérialisation de paires d'électrons des deux signes: ( $2 m_0 c^2 = 10^6$  eV) grâce au champ électrique intense existant au voisinage du noyau. Elle croît alors rapidement avec le numéro atomique et l'énergie du photon.

Bien qu'on ne puisse comparer l'absorption de quanta de  $10^6$  eV avec celle de rayons cosmiques primaires de  $10^{10}$  V, la constance du coefficient massique semble montrer que, dans tous les cas, y compris l'effet barométrique, l'absorption intéresse seulement les électrons secondaires constituant les gerbes. L'absorption nucléaire des photons cosmiques n'est sensible que dans un absorbant énorme tel que l'atmosphère. Les gerbes y sont beaucoup plus rares que dans le blindage, mais leur parcours y est, inversement, beaucoup plus grand.

**Mesure absolue du rayonnement cosmique.** — J'ai effectué cette mesure avec l'appareil de Kolhörster

sur un glacier bien dégagé : le Hvide Fjeld (1), vaste coupole de glace à profil d'inlandsis, tout à fait analogue aux jökulls de Norvège ou d'Islande, dominant de 800 m toute la partie sud de la Terre de Liverpool. L'épaisseur centrale de cette calotte glaciaire, qui s'écoule vers le Nord en formant deux grands glaciers descendant dans la mer, fut déterminée par les lieutenants de vaisseau Habert et Douguet par des sondages acoustiques et trouvée égale à environ 65 m. Le matériel fut transporté par des traîneaux attelés de



Fig. 6.

chiens esquimaux. Nous campâmes, le commandant Habert et moi, les 12, 13 et 14 juin, au centre de ce glacier (voy. fig. 6). La pression atmosphérique demeura très constante ( $H = 689$  mm) durant cette période, quoique une violente tempête de neige faillit durant vingt-quatre heures interrompre les mesures. L'appareil de Kolhörster était disposé sous la tente et un réveil (non radioactif!) en permettait la lecture et

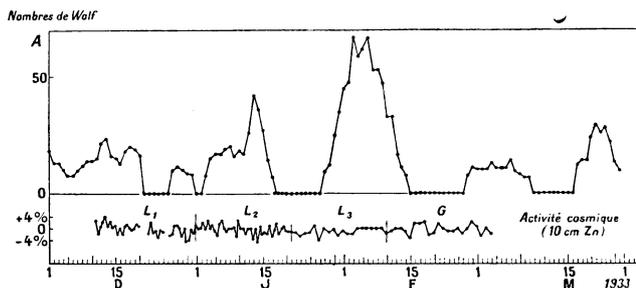


Fig. 7.

la charge toutes les heures. La moyenne de 40 lectures donna le point P de la fig. 4, qui correspond à une intensité de  $\mathcal{J} = 2,81 I$  au niveau de la mer. La figure 7 reproduit une courbe diurne montrant la grandeur de la fluctuation horaire. Celle-ci atteint  $3/4 I$  soit 25 pour 100 (2). La précision des mesures

(1) Le « Mont Blanc ».

(2) Il faut retrancher la fluctuation due aux rayons  $\alpha$  qui s'élève à quelques centièmes.

est démontrée par les points représentant les lectures initiales horaires de l'électromètre. Celles-ci sont constantes à  $1/2$  pour 100 près. La tension était fournie par des accumulateurs au nickel-cadmium.

On peut se demander si, dans ces conditions, la mesure n'est pas encore entachée de quelque cause d'erreur : la radioactivité de l'air par exemple. Durant les mesures le vent soufflait du nord-est, c'est-à-dire du large : le Hvide Fjeld n'est séparé de l'Océan, dans cette direction, que par de grands glaciers. La mer était elle-même couverte de glaces. Ces conditions sont celles dans lesquelles se trouvait Béhounek (*loc. cit.*) à bord de l'« Italia » et la mesure de la radioactivité de l'atmosphère, à la même altitude ne lui donna régulièrement guère plus de  $10.10^{-19}$  curie  $\text{cm}^3$  d'émanation du radium, quantité négligeable, cinquante fois plus faible que sous nos latitudes.

La droite D de la figure 4 donne, par ailleurs, une limite inférieure de l'intensité ( $J = 2,3 I$ ) du rayonnement cosmique pur. Or, si l'on tient compte de l'absorption exercée par la neige (environ 1 m d'eau), on retrouve sensiblement la droite C. L'intensité ne semble pas pouvoir être inférieure à  $J = 2,7 I$ , c'est-à-dire que l'effet de latitude paraît certain.

« **Activité** » du rayonnement cosmique. — Il était particulièrement intéressant d'étudier, au Scoresby Sund, les variations de l'intensité, ou « activité », comparativement aux activités aurorale ou magnétique et à l'activité solaire. Ces mesures ont été effectuées d'une manière permanente et sans interruption, avec la chambre à haute pression, blindée ou non, disposée, dans le laboratoire (du 11 décembre 1932 au 10 février 1933); dans la grotte de neige (du 10 février au 27 mai), puis, de nouveau, au laboratoire (27 mai au 21 juillet). L'appareil était lu et chargé toutes les 12 heures, à 0 h et 12 h G. M. T. Les variations d'enneigement ôtent, bien entendu, toute signification aux variations mensuelles et seules les variations portant sur quelques jours consécutifs sont à considérer. Les valeurs ont été corrigées de l'effet barométrique et sont rapportées à la pression de 760 mm au niveau de la mer.

La figure 8 reproduit la partie la plus intéressante de ces variations : celle commençant au début de janvier 1933 et correspondant à l'évolution d'un foyer unique d'activité solaire ayant présenté son maximum (nombre de Wolf égal à 67) au début de février. Nous avons vu <sup>(1)</sup> que les activités aurorale et magnétique étaient, pendant cette période, en opposition de phase avec l'activité solaire, le début de février ayant été extrêmement calme, tandis que des aurores d'une intensité exceptionnelle s'étaient répétées régulièrement les 20, 21 et 22 février.

La courbe représentant la variation de l'intensité des rayons cosmiques, se compose de quatre parties. Les deux premières, *L 1* et *L 2*, représentent les mesures biquotidiennes effectuées dans le laboratoire.

(1) A. DAUVILLIER, *J. Phys.*, août 1934, t. 5, p. 398.

Elles se rapportent à deux droites d'étalonnage distinctes et décroissent régulièrement du fait de l'enneigement. Les suivantes, *L 3* et *G* représentent l'intensité moyenne quotidienne de 12 h à 0 h (les périodes de 0 h à 12 h correspondant à des mesures effectuées sans blindage), respectivement dans le laboratoire et la grotte de neige. Les variations atteignent 8 pour 100.

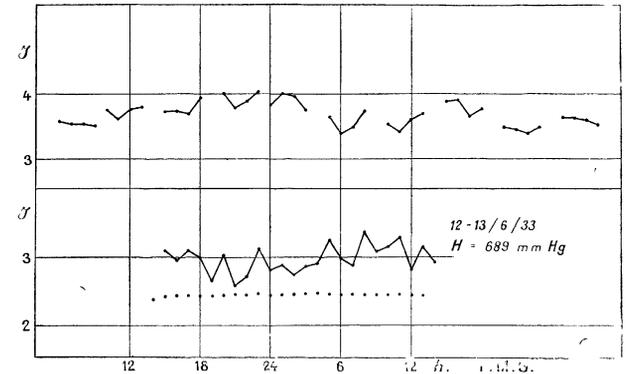


Fig. 8

On voit, qu'en première approximation (à 1 pour 100 près), il n'existe aucune relation entre l'intensité moyenne des rayons cosmiques et les activités solaire ou aurorale. Les points expérimentaux (*L 1* et *L 2*) ne sont pas distribués au hasard, mais montrent des variations lentes évoluant régulièrement durant plusieurs jours. Ces variations ne sont donc pas attribuables aux gerbes ni aux explosions (Hoffmann Stösse), la durée de la mesure (12 h) étant suffisante pour dissimuler ces accidents.

La période s'étendant du 4 au 9 février, constante à  $1/2$  pour 100 près, est également remarquable. Elle montre, en outre, le degré de précision des mesures.

Cette question, d'une relation possible entre l'intensité moyenne des rayons cosmiques et les activités solaire et magnétique, a été l'objet d'observations récentes de Hess au Hafelekar (2 300 m) près d'Innsbrück, et de Corlin (*loc. cit.*) à Abisko, utilisant tous deux l'enregistreur sensible et précis de Steinke. Des influences très faibles mais contradictoires ont été observées : Ainsi Corlin avait trouvé en 1929-30, avec un appareil de Kolhörster, une intensité plus forte durant les aurores, tandis qu'en 1932-33, avec l'appareil plus précis de Steinke, cette corrélation disparut.

Par contre, l'intensité variait durant cette dernière période avec l'activité solaire, ce qui indiquerait l'émission d'un faible rayonnement cosmique (quelques millièmes) par le soleil sous forme de photons. Ce résultat est en accord avec la variation diurne (maximum) de  $2/1000$  à 12 h de temps local, au niveau de la mer, trouvée par Hess et ses collaborateurs.

D'autre part, Hess et Steinmaurer <sup>(1)</sup>, ne trouvent aucune relation avec l'activité solaire et observent, contrairement au résultat de Corlin, une très faible diminution de l'intensité au début des orages magné-

(1) *Nature*, octobre 1933, t. 132, p. 601.

tiques. (24 orages de 1931 à 1933). Il faut attendre de nouvelles recherches avant de pouvoir conclure. Il en est de même pour d'autres sujets controversés tels que l'effet barométrique de second ordre, l'influence de la température extérieure, de l'humidité, de la nébulosité, etc. Les faibles variations observées au Scoresby Sund se retrouvent-elles sous d'autres latitudes? Corlin a publié une courbe analogue pour l'Année polaire à Abisko. Quelques détails semblent se retrouver, mais la ressemblance demeure incertaine.

Corlin a trouvé un accord approximatif (les explosions d'Hoffmann le perturbent), entre les moyennes mensuelles observées à Abisko, et celles trouvées par Steinke à Königsberg (1932-1933). Il est donc nécessaire aujourd'hui d'effectuer des enregistrements prolongés de haute précision dans des conditions aussi pures que possible, et en de nombreux points du Globe.

Les meilleures mesures seraient évidemment effectuées dans une grotte de neige d'épaisseur constante. Pour nous rapprocher de ces conditions idéales, nous avons, grâce au concours de la Caisse des Recherches scientifiques et du Directeur de l'Observatoire de Paris, fait édifier sur la terrasse supérieure de l'Observatoire de Meudon (à défaut du Pic du Midi), une chambre d'observation métallique ( $h = 2$  m,  $d = 2$  m), complètement entourée par une épaisseur d'un mètre d'eau distillée. Ce réservoir, calorifugé et de grande inertie calorifique, sera maintenu, en outre, à une température constante au moyen d'un thermostat électrique. Cette chambre recevra l'enregistreur précédemment décrit.

**L'origine des rayons cosmiques.**—Nous allons examiner rapidement dans quelle mesure ces résultats expérimentaux s'accordent avec la théorie de l'origine des rayons cosmiques que nous avons proposée en 1931<sup>(1)</sup>.

Tout d'abord, et comme Millikan l'a fait remarquer, ces rayons, par suite de leur grande absorbabilité (l'atmosphère en absorbe 98 pour 100) ne peuvent provenir que de régions très raréfiées de l'espace, comme les confins des atmosphères stellaires ou terrestre. Cette remarque écarte la théorie de C. T. R. Wilson qui les attribue à la foudre. La répartition géographique des orages est d'ailleurs opposée à la variation géomagnétique des rayons cosmiques. Bien qu'aucun orage n'ait été observé au Scoresby Sund durant l'Année polaire, nous avons vu que l'intensité des rayons cosmiques y était forte et constante.

L'origine stellaire de ces rayons se heurte également à des impossibilités. La variation diurne sidérale ne s'est pas confirmée; le Soleil n'en est pas une source directe notable; des photons ne sauraient montrer l'effet de latitude et des électrons isotropes donneraient une très forte intensité dans la région du pôle de Gauss. La perte d'énergie subie par les électrons cosmiques dans les chambres de Wilson (90 paires d'ions ou  $10^3$  eV, par centimètre de parcours dans l'air à la pression atmosphérique), correspond aussi à un trajet

(10 km d'air normal) dépassant à peine la traversée radiale de l'atmosphère, par conséquent hors de proportion avec le pouvoir de pénétration du rayonnement suivi par Regener jusqu'à 250 m de profondeur dans l'eau<sup>(1)</sup>. Si nous ne voulons pas faire appel à d'hypothétiques électrons d'énergie colossale ( $10^{11}$  eV, électrons de Swann), nous devons donc admettre que les rayons cosmiques traversent notre atmosphère sous forme de photons, excités dans les confins de l'ionosphère, par un flux de corpuscules se propageant au voisinage du plan de l'écliptique, par conséquent d'origine solaire, et influencés par le champ magnétique terrestre.

En réalité, les rayons cosmiques ne doivent pas être considérés isolément dans l'Univers, mais en liaison avec les autres phénomènes géophysiques associés au champ magnétique terrestre et, puisque toutes les énergies que nous connaissons sur la Terre (à l'exception de l'infime rayonnement thermique stellaire), proviennent du Soleil, c'est dans cette étoile que nous devons chercher la source et une source *actuelle* de leur énergie.

Mais nous devons d'abord nous demander pourquoi l'intensité des rayons cosmiques n'apparaît pas liée au cycle solaire comme le sont les phénomènes électromagnétiques (magnétisme, tellurisme, aurores, etc...) produits sur notre Globe par le Soleil, mais paraît, au contraire, tout aussi constante que le rayonnement thermique solaire : la *constante* solaire qui, elle aussi, varie d'une manière apparemment désordonnée.

Or les mesures magnétiques se font avec une approximation de  $10^{-5}$  gauss, soit à  $2.10^{-5}$  près. Les plus violents orages magnétiques correspondent, tout au plus, à une variation de  $H$  de 2 pour 100. Ces perturbations peuvent d'ailleurs être dues, en partie, à des trajectoires électroniques extérieures à l'ionosphère.

Les aurores polaires les plus intenses ne durent, en une région donnée du Globe, qu'un temps très court (quelques secondes), elles n'occupent qu'un très petit volume de l'espace et leur brillance est très faible. Elles ne représentent, au total qu'une variation infime de l'énergie dépensée d'une façon permanente, par l'aurore mondiale. Les données relatives aux variations de celle-ci manquent encore totalement.

D'autre part, l'activité solaire est caractérisée par les « nombres de Wolf », coefficients empiriques calculés en estimant la grandeur et le nombre des taches solaires; Ceux-ci ne mesurent nullement l'intensité du flux électronique solaire. Au contraire, l'intensité lumineuse de la couronne, durant les éclipses totales, semble assez constante et indépendante de l'activité solaire<sup>(2)</sup>, comme si celle-ci avait surtout pour effet de modifier dans l'espace la distribution des jets coronaires.

Cette analyse montre donc, qu'au total, si les rayons cosmiques dépendent de l'activité solaire, la

<sup>(1)</sup> Il est de même impossible de faire traverser la troposphère à des positrons cosmiques. L'atmosphère étant équivalente à 8 km d'air, un positron, même animé de la vitesse  $c$ , mettrait, sous l'incidence radiale :  $8 : 300\,000 = 27$  microsecondes pour la traverser, alors que sa vie moyenne ne dépasserait pas, d'après Dirac, une microseconde dans ce milieu.

<sup>(2)</sup> A. DAUVILLIER, *L'Astronomie*, mars 1934, p. 105; avril 1934, p. 153; mai 1934, p. 209.

<sup>(1)</sup> A. DAUVILLIER, *C. R.*, août 1931, t. 193, p. 348; *Rev. gen. Electr.*, t. 31, 5 mars, 2 et 9 avril, 1932.

variation correspondante sera faible et probablement masquée soit par les fluctuations, soit par ces variations désordonnées, d'origine inconnue, que nous enregistrons. Ce manque de corrélation peut d'ailleurs n'être vrai qu'au sol : dans quatre mesures récentes (1933), effectuées à haute altitude (15 km), Regener (1) a observé trois fois la même intensité, par calme magnétique et, un jour d'agitation moyenne, une augmentation de 15 pour cent. Il faut attendre de nouvelles mesures pour pouvoir affirmer la réalité de cette intéressante corrélation.

Les variations du rayonnement cosmique, qui, jusqu'ici, semblent surtout locales, pourraient être dues aux variations locales de densité de l'ionosphère traversée par les électrons solaires enroulés dans le champ magnétique terrestre. Nous avons vu que les aurores polaires décelaient une très grande hétérogénéité et une grande turbulence de l'ionosphère. Si celle-ci représente bien l'anticathode responsable de la production des rayons cosmiques que nous observons, de telles variations seraient analogues aux régimes cycloniques et anticycloniques de la troposphère. Mais cette question pose le difficile problème de l'équilibre de l'ionosphère, de la dispersion dans l'espace; de son entraînement par la rotation de la Terre de sa déformation par la pression de la radiation solaire et des champs électriques, encore inconnus, qui y règnent probablement.

On peut espérer que les sondages hertziens de l'ionosphère nous apprendront beaucoup dans ce domaine.

Enfin, la nouvelle interprétation que nous avons donnée de l'aurore polaire est un argument de plus en faveur de l'origine solaire des rayons cosmiques. Rappelons seulement que ce phénomène est considéré comme un cas particulier, une transformation locale (contraction) de l'aurore permanente mondiale. Le rayon de courbure de la zone polaire, de Fritz, permet le calcul de l'énergie des électrons solaires, soit environ  $2.10^{10}$  eV. En outre, la considération de la largeur de la zone équatoriale exempte de draperies, permet le calcul de l'énergie maxima des électrons solaires, soit :  $3,5.10^{10}$  eV. Ces valeurs s'accordent bien avec les quanta d'énergie mis en œuvre dans les phénomènes présentés par les rayons cosmiques (2). La nature photonique, que la théorie prévoit pour les rayons cosmiques, est par ailleurs démontrée par des clichés d'Anderson montrant la gerbe produite, dans un écran de plomb par l'absorption d'un photon de 1 à  $3.10^9$  eV.

D'autre part, l'énergie des rayons magnéto-cathodiques constituant les aurores semble aussi, comme nous l'avons vu, être du même ordre de grandeur ( $10^7$  eV) que celle des électrons formant les gerbes observées dans les chambres de Wilson.

Mais, si ces rayons puisent leur énergie dans le Soleil, il faut encore rendre compte de l'existence d'un champ électrique solaire régnant dans les confins de la chro-

mosphère. Ce champ doit être de même sens que le champ terrestre. La relation de Poisson indique alors qu'il est dû à une charge spatiale d'ions positifs.

Guy (1), dans des notes d'un grand intérêt, a montré que la chromosphère devait être prodigieusement raréfiée ( $10^{-3}$  barye) (2) et que son énorme étendue était due à la pression de la radiation photosphérique, L'atmosphère solaire est, en quelque sorte, soufflée par la pression de radiation. L'ion sur lequel s'exerce cette pression est  $Ca^+$ , très fortement absorbant par ses intenses raies H et K. L'électron n'est, au contraire, pas soumis à cette force. Il résulte de ce travail, effectué contre la gravitation, la création d'une atmosphère à charge spatiale positive, source d'un champ électrique, faible mais étendu, créé aux dépens de la pression de radiation.

Non seulement celle-ci joue un rôle essentiel dans l'équilibre interne des étoiles, comme Eddington l'a magistralement démontré, mais elle joue, à notre avis, un rôle non moins important dans la création du champ électrique responsable de l'émission électronique solaire, c'est-à-dire de la couronne (3) et de la lumière zodiacale. Cet équilibre entre la pression de radiation et le champ électrique est statistique. L'émission des jets d'ions positifs ou protubérances, associées aux plages faculaires, montre que la pression l'emporte parfois sur le champ. C'est cette émission complémentaire qui assure l'équilibre électrostatique solaire. La perte de masse correspondante est du même ordre que la perte de masse par radiation.

L'« atmosphère » chromosphérique de  $Ca^+$  peut être considérée comme maintenue en perpétuel état d'ionisation presque totale par le rayonnement ultraviolet (potentiel d'ionisation de  $Ca$  : 6V), comme le montrent les calculs de Saha, si bien qu'il suffit d'une densité excessivement faible, c'est-à-dire d'une pression infime, pour assurer, en vertu de la relation de Poisson, un champ électrique de l'ordre de grandeur du champ terrestre. Lorsque les électrons chromosphériques ont acquis une énergie suffisante pour les rendre capables d'exciter des rayons cosmiques de haut quantum, ils n'ont plus qu'une masse matérielle impondérable à traverser (de l'ordre de la masse qu'ils traversent dans leur trajet du Soleil à la Terre : 1 cm d'air sous 1/10 de barye, en admettant 1 atome par  $cm^3$ ), par rapport à la masse qu'ils traversent dans l'ionosphère (au moins 1 cm d'air, sous  $10^3$  baryes). Le Soleil ne saurait donc, selon la théorie, être une source notable directe de rayons cosmiques.

En résumé, la théorie s'accorde avec ce que nous savons de physique solaire; elle établit un lien quantitatif entre les rayons cosmiques et les phénomènes auroraux et magnétiques, et elle interprète de la manière la plus simple les divers phénomènes relatifs aux rayons cosmiques sans être incompatible avec aucun d'eux.

(1) C. R., juillet 1913, t. 157, p. 187, juillet 1912, t. 155, p. 415. — (2) C'est à peu près la tension de vapeur du tungstène dans une lampe à 2 600° K. — (3) Il en résulte que la brillance de la couronne doit varier en raison inverse de la 3<sup>e</sup> puissance de la distance au bord solaire.