128

EXTRAIT DE

L'ASTRONOMIE

REVUE MENSUELLE D'ASTRONOMIE

DE MÉTÉOROLOGIE ET DE PHYSIQUE DU GLOBE

BULLETIN DE LA

SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE FRANCE

SIÈGE DE LA SOCIÉTÉ ET OBSERVATOIRE

HOTEL DES SOCIÉTÉS SAVANTES

AURORES POLAIRES ET RAYONS COSMIQUES [1]

Observations faites au Scoresby Sund pendant l'Année Polaire

Comme le disait M.. Deslandres, il y a déjà longtemps, le problème des relations existant entre le Soleil et la Terre est l'un des plus passionnants qu'un homme puisse se proposer. Mais, à cette époque, nos connaissances en physique stellaire étaient bien restreintes et il fallait toute la pénétrante intuition des grands précurseurs Deslandres et Birkeland pour oser l'aborder.

Aujourd'hui, l'étude de la décharge électrique dans les gaz raréfiés est



Fig. 38. — Le Soleil de minuit dans l'Hurry Inlet.

devenue l'un des chapitres les plus importants de la physique et elle trouve une application immédiate à ces tubes à vide géants que sont les atmosphères stellaires.

On a souvent édifié des théories du Soleil basées sur de soi-disant analogies, d'ordre météorologique, supposées exister entre ces deux corps célestes. Rien n'est plus trompeur ni plus dangereux à notre avis : il n'y a aucune analogie possible entre les phénomènes thermodynamiques présentés par notre atmosphère et la chromosphère formée de gaz ultra-raréfiés presque totalement ionisés par un rayonnement d'une densité extraordinaire.

L'énergie irradiée par les étoiles sous forme électrique est certainement

beaucoup plus grande que l'énergie thermique qu'elles émettent. Mais, si la Terre reçoit *cent* fois plus d'énergie sous forme de rayons cosmiques que de radiation thermique stellaire, c'est par suite de la proximité du Soleil, source de l'énergie de ces rayons.

J'ai cherché, il y a deux ans (1) à édifier une synthèse permettant d'expliquer du même coup tous les phénomènes terrestres liés à l'émission électrique solaire, à partir de conceptions simples relatives à la chromosphère. La difficulté d'une telle synthèse vient du fait que, tandis que certains phénomènes géophysiques, tels que les aurores polaires et le magnétisme, suivent avec évidence l'activité solaire, d'autres, tels que l'ozone, l'électricité atmosphérique, les rayons cosmiques, semblent apparemment indépendants de cette activité. Nous verrons plus loin quel est le sens de cette apparente contradiction.

Le point de départ de la théorie est une nouvelle interprétation de l'aurore polaire, basée sur les observations faites par Nordenskjöld en 1878 pendant l'hivernage de la « Véga ». Selon ces observations et d'accord avec la carte de fréquence aurorale de Fritz, les arcs auroraux font partie de couronnes lumineuses circulaires, centrées sur l'axe magnétique de Gauss et faisant le tour entier du Globe. J'ai considéré ces couronnes concentriques comme la projection, selon les lignes de force du champ magnétique terrestre, des géodésiques décrites par les électrons solaires sur les tubes de force magnétique terrestres. Ces électrons primaires gravitent à une grande altitude, de l'ordre du rayon terrestre et s'échappent sans charger le Globe. Cette altitude rend compte du centrage du phénomène sur le pôle théorique de Gauss au lieu du pôle de déclinaison (fig. 39).

Les électrons secondaires, émis par impact sur le gaz de la haute atmosphère, décrivent à leur tour des géodésiques de très petit rayon de courbure, par suite de leur plus faible énergie. Une partie d'entre eux se dirigent vers le Globe et la limite de leur parcours, qui marque l'altitude du bord inférieur net des arcs auroraux (100 km.), mesurerait leur pouvoir de pénétration et leur énergie s'ils se propageaient en ligne droite. Leur rayon de courbure correspond plutôt à une énergie de quelques millions d'électrons-volts.

Les trajectoires des électrons solaires dans le champ magnétique du Globe se divisent en orbites polaires et équatoriales. Les premières donnent naissance aux aurores polaires, qui apparaissent ainsi comme le résultat secondaire d'un phénomène cosmique initial lui-même non visible. Les différents arcs concentriques de Nordenskjöld représentent *les « raies » du spectre magnétique terrestre des électrons solaires*. Leur rayon de courbure permet de

calculer l'énergie de ceux-ci. Elle correspond à 10^{10} fois le produit de 1 volt par la charge d'un électron.

Les trajectoires équatoriales et non polaires donnent naissance, en tout point du Globe où la composante verticale du champ magnétique n'est pas nulle, à un phénomène lumineux analogue, qui constitue l'aurore non polaire de Lord Rayleigh rendant compte de la luminosité du ciel nocturne. L'estimation de la brillance du ciel nocturne permet l'évaluation de l'énergie

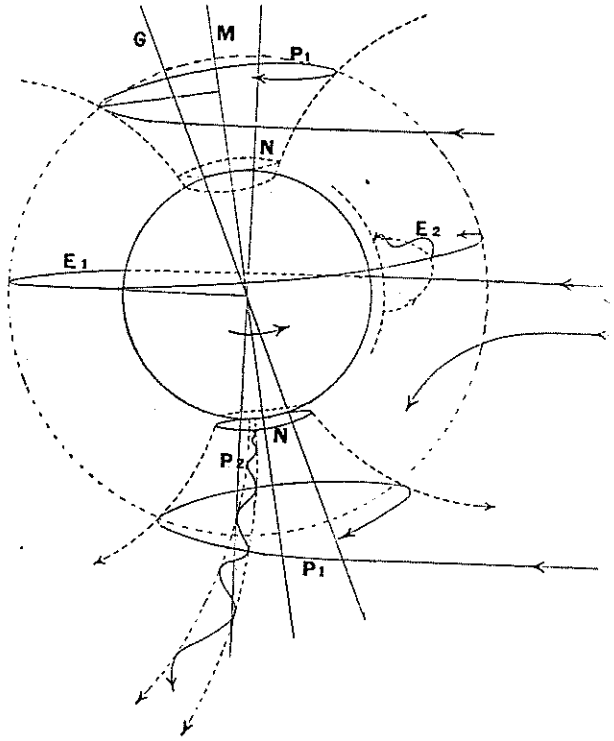


Fig. 39

P_1. — Trajectoire polaire des électrons solaires dans le champ magnétique terrestre.
P_2. — Trajectoire des électrons secondaires stratosphériques donnant les rayons des arcs auroraux.
E_2. — Trajectoire équatoriale des électrons solaires donnant naissance à l'aurore non polaire (trajectoire E_2) et aux rayons cosmiques.

dépensée dans la haute atmosphère par les électrons solaires. L'évaluation photométrique de la brillance des arcs polaires, que j'ai d'abord faite à la station magnétique des Sodankylä, en Laponie finlandaise, montre que les « orages auroraux », c'est-à-dire les phénomènes accidentels polaires, mettent mille fois moins d'énergie en jeu que l'aurore générale permanente.

L'excitation, l'ionisation et la polymérisation des gaz de la stratosphère

et la production de l'ozone atmosphérique. Les aspects complexes présentés par les orages auroraux intenses (rayons, draperies ondoyantes parcourues par des ondes lumineuses longitudinales, etc.) sont des effets secondaires, de nature non cosmique, et dus à la turbulence de la stratosphère. Les « vents », ainsi produits, d'origine électromagnétique, de même que les perturbations du champ terrestre accompagnatrices, sont liés à l'accroissement d'intensité du courant primaire. La transformation, sous toute latitude, d'un arc diffus en draperie mince est due à la contraction électrostatique des orbites primaires dans l'ionosphère, causée par un accroissement de l'intensité (phénomène des oscillographes cathodiques).

L'aurore polaire apparaît ainsi comme un magnétographe géant à rayons cathodiques dont les draperies dessinent sur l'écran du ciel les perturbations des lignes de force magnétiques.

La nouvelle théorie des aurores polaires s'écarte de celles de Birkeland et Störmer, mais se rapproche, par la considération d'électrons secondaires atmosphériques, de celle de Villard.

J'ai effectué la synthèse de l'aurore de Nordenskjöld, au moyen d'un modèle montrant les variations annuelle et diurne, en utilisant un faisceau d'électrons de quelques centaines de volts : les trajectoires primaires et secondaires sont rendues visibles par leur trace dans une atmosphère de néon raréfié (1).

Les orbites électroniques primaires agissent comme des bobines démagnétisantes et rendent compte des perturbations magnétiques intéressant le Globe tout entier. L'évaluation de l'intensité du courant, déduite de l'énergie dépensée dans un orage auroral, donne l'ordre de grandeur de la variation de la force magnétique totale lors de la perturbation correspondante. Les régions polaires sont, en outre, localement perturbées par les trajectoires secondaires qui peuvent augmenter ou diminuer la composante verticale.

Tandis que les perturbations sont dues à des éruptions électroniques solaires accidentelles, la variation diurne du magnétisme terrestre est due aux mouvements réguliers de l'axe magnétique terrestre dans un flux sensiblement constant.

Les orbites primaires polaires démagnétisantes se comportent comme les « aimants » de la théorie de Faraday tournant autour des pôles en suivant le Soleil. Les jours très rares dénués de variation correspondent aux jours où la couronne de Nordenskjöld n'apparaît pas.

Si l'on considère le système : « Globe troposphère-couche conductrice » comme un condensateur sphérique, on voit que le courant atmosphérique vertical est dû à l'apport de charges positives à la couche conductrice, par

suite de la perte d'une partie des électrons secondaires et à la « fuite du diélectrique » due à l'ionisation causée par les rayons cosmiques. Les variations du courant vertical, simultanées en tous les points du Globe, résultent des variations de l'ionisation provoquée par les électrons solaires, par suite de la rotation de l'axe magnétique terrestre.

Il existe ainsi un rapport étroit entre le courant vertical et les courants telluriques. Suivant la théorie, ceux-ci sont dus aux courants de charge et de décharge du condensateur considéré ci-dessus. Dans les régions polaires, les

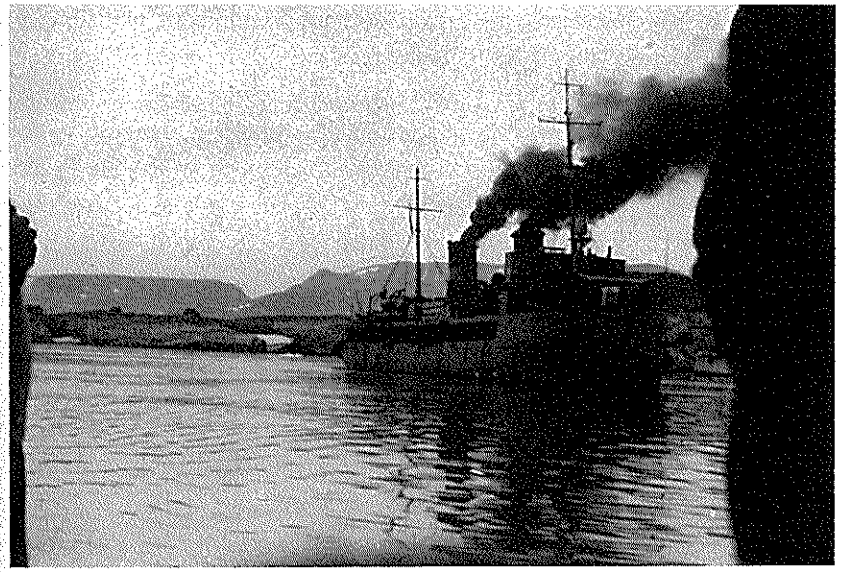


Fig. 40. — Le « Pollux » au mouillage, au Scoresby Sund.

phénomènes auroraux apportent à la base de la stratosphère des ions négatifs, tandis que, dans la région équatoriale éclairée, l'ionisation due au rayonnement ultraviolet solaire provoque un excès d'ions positifs. Des courants telluriques superficiels ferment le circuit en circulant dans l'hémisphère éclairé en suivant le méridien magnétique. Le calcul montre que la puissance mise en jeu par ces courants dans la variation diurne est beaucoup plus faible que dans le cas du courant vertical.

Selon la théorie, les rayons cosmiques sont des rayons de Röntgen produits par l'impact des électrons solaires sur le gaz de la haute atmosphère. Le quantum maximum de ces rayons, 2×10^9 fois le produit de 1 volt par la charge d'un électron, apparaît bien de même ordre que l'énergie des électrons solaires.

primaires polaires et équatoriales, à une altitude de l'ordre de son rayon, le ciel tout entier paraîtra être la source des rayons de Hess. Cet effet sera encore accru par la diffusion, si bien que leur intensité sera presque indépendante de la latitude. La variation diurne sera solaire, mais très faible, notre atmosphère s'étendant théoriquement jusqu'à 6,6 rayons terrestres. On peut calculer qu'un orage « auroral-magnétique-tellurique » ne saurait accroître l'intensité des rayons cosmiques que d'une quantité de l'ordre du millième. Ces conclusions sont en accord avec les observations.

Doit-on s'étonner de l'émission par le Soleil d'électrons d'une telle énergie ? Il semble, au contraire, que celle-ci soit, non seulement plausible, mais nécessaire. Le champ électrique de quelques volts par centimètre régnant à la base de la troposphère d'une planète aussi petite que la Terre, suffit déjà à causer, entre le Globe et la couche conductrice, une différence de potentiel voisine de 10^6 volt. Or ces effets sont considérablement grandis dans les atmosphères stellaires. J'ai considéré les grains de riz et les facules solaires comme étant de la nature du spot cathodique de l'arc (par exemple de l'arc à vapeur de mercure à basse pression). Ces facules sont la source d'électrons lents qui sont accélérés radialement dans le champ électrique de la chromosphère. Ce champ est dû à la charge spatiale positive (atmosphère du tube de Crookes) causée par l'ionisation due au rayonnement ultraviolet de la chromosphère. Il pourrait être très faible, du même ordre de grandeur que le champ terrestre, et s'étendre sur une plus grande étendue, mais il est probablement plus intense, l'ionisation étant considérable et la pression très faible. Les électrons solaires peuvent logiquement y acquérir une énergie de l'ordre de 10^{10} électrons-volts et, déviés par le champ magnétique externe, montrer l'apparence de la couronne solaire grâce à la lumière qu'ils diffusent. Les électrons solaires produiront aussi quelques rayons cosmiques en traversant les confins de la chromosphère, mais leur intensité sera négligeable pour nous devant celle des rayons cosmiques produits dans notre atmosphère.

Cette émission nécessite naturellement un mécanisme compensateur qui est l'émission de jets d'ions positifs constituant les protubérances associées aux plages faculaires. Ces éruptions chromosphériques, d'origine électrostatique, peuvent être favorisées par la pression de radiation. L'estimation de la densité du flux électronique solaire au niveau de notre Globe, soit 10^{-9} A/cm^2, permet le calcul de la perte de masse subie par le Soleil du fait de ces éruptions : le résultat est du même ordre de grandeur (10^6 t/sec..) que la perte de masse due au rayonnement thermique.

(*A suivre*).

A. DAUVILLIER
Docteur ès-sciences.

AURORES POLAIRES ET RAYONS COSMIQUES [1]

Observations faites au Scoresby Sund pendant l'Année Polaire

L'aspect des « grains de riz » suggère que la discontinuité limitée par le disque solaire est d'origine électrique et les considérations spectrales sont favorables à cette hypothèse. Mais, la température de ces « spots cathodiques » étant supérieure à celle de la couche sous-jacente visible autour d'eux, dans les pores et dans les taches, leur surface totale ne saurait excéder une fraction de l'aire photosphérique. Le rayonnement issu de ces pores et absorbé dans la chromosphère inférieure alimente cette myriade d'arcs en

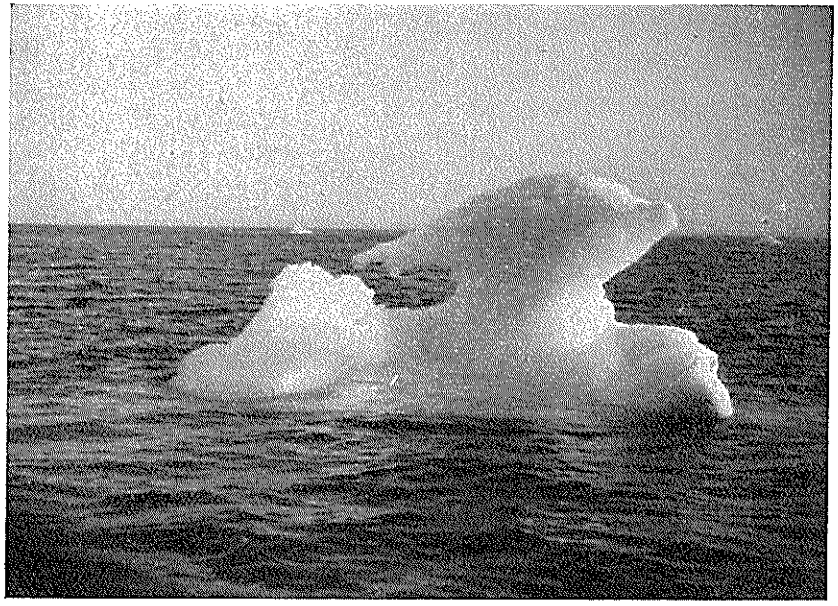


Fig. 52. — Un « cygne » sur la mer polaire.

perpétuel état d'allumage et d'extinction. Cette représentation explique une observation de Trouvelot qui, en 1883, a remarqué que certaines facules portaient *ombre* sur les taches.

Le rayonnement solaire ne serait ainsi qu'indirectement d'origine thermique. La photosphère ne serait pas constituée de « nuages incandescents » mais de *lueurs cathodiques*, constituant une enveloppe mince et discontinue entretenue de l'extérieur. La loi de Lambert n'étant pas applicable à une surface rayonnante *pelliculaire*, le Soleil devrait nous apparaître moins brillant au centre qu'à la périphérie, mais l'absorption exercée par la chromosphère renverse cette apparence. Cet aspect nous permet même d'affirmer que le Soleil nous envoie au moins autant d'énergie sous forme électrique

que sous forme thermique. En effet, la brillance des bords du disque solaire n'étant que les quatre dixièmes de la brillance centrale, cet aspect dénote l'absorption, par la chromosphère, d'une fraction très importante du rayonnement de la photosphère. Or, Julius, mesurant, lors de l'éclipse de 1912, le rayonnement chromosphérique total, n'a guère trouvé plus du millième du rayonnement photosphérique. Qu'était donc devenue l'énorme énergie absorbée ainsi disparue ? C'est pour répondre à cette question que l'astronome hollandais, niant l'évidence, a nié l'existence de la photosphère et de

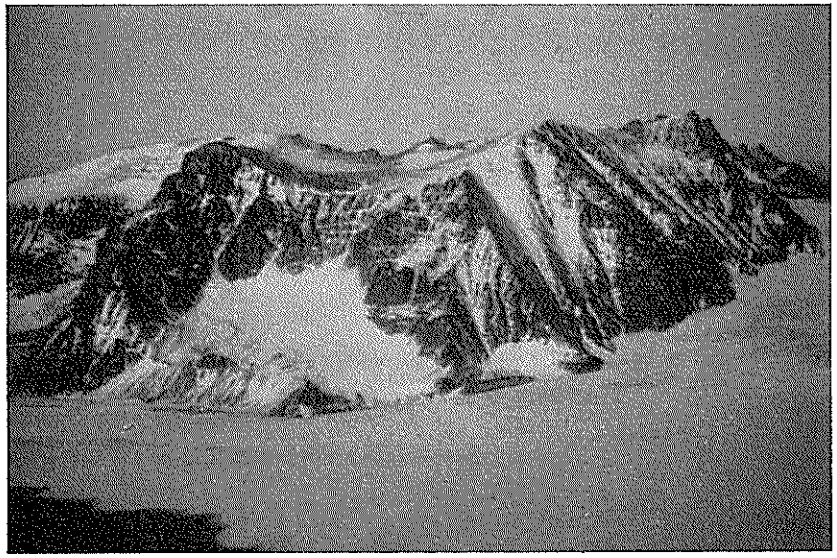


Fig. 53. — Panorama du Mont Wegener (1 450 mètres) vers le centre de la Terre de Liverpool.

ses accidents, taches, facules, protubérances et a tenté d'expliquer l'apparence du disque solaire par un phénomène de mirage. Si nous affirmons, au contraire, la réalité de l'existence de ce disque, dû à une discontinuité lumineuse électrique dans un volume gazeux continu, nous voyons que la moitié, au moins, du rayonnement thermique s'est transformée en énergie électrique, et nous obtenons immédiatement, par des considérations tout à fait indépendantes de celles exposées plus haut, la *limite inférieure* du flux électronique solaire rencontrant la Terre. A une constante solaire de 0,14 watt /cm^2 correspond, en effet, une densité électronique de $0{,}14 \cdot 10^{-10}$ amp./cm^2 en supposant une distribution uniforme et une énergie de 10^{10} eV.

Ce flux est 10^5 fois plus grand que le courant vertical atmosphérique et 10^{10} fois plus grand que le flux électronique cosmique au sol. Il ne rencontre donc pas la Terre, étant dévié par son champ magnétique.

la lumière rend compte par ailleurs de certaines coïncidences observées entre des cataclysmes solaires et des orages magnétiques, en périodes de maxima solaires et dus à l'émission d'électrons possédant une énergie exceptionnellement grande.

Les retards de quelques dizaines d'heures, constatés le plus souvent entre le passage d'un foyer actif par le méridien central du Soleil et les phénomènes géophysiques associés, sont interprétés, non par la durée de propagation d'un rayonnement, ni une période de latence, mais par une courbure des trajectoires coronales due au champ magnétique de Deslandres.



Fig. 54. — Panorama du Mont Wegener sur le Cap Tobin.

Les jets coronaux sont localisés, aux distances de l'ordre de l'orbite terrestre, selon deux nappes voisines et symétriques du plan de l'équateur solaire. Notre Globe y pénètre au maximum aux équinoxes et c'est à ces époques que les phénomènes électromagnétiques produits sur la Terre par les électrons solaires sont le plus intense. Par suite de la rotation du Soleil, ces jets coronaux balayent le plan de l'écliptique et abordent notre Globe par son côté soir, à la vitesse tangentielle de 400 km /sec. L'ensemble de ces jets, vus par la tranche et rendus visibles par la lumière solaire qu'ils diffusent, constitue la lumière zodiacale. Lorsqu'un tel jet coronal s'approche de la Terre, il commence par l'aimanter, puis la désaimante lorsqu'il l'a dépassée. Mais, par suite du ferro-magnétisme de l'écorce du Globe, celui-ci conserve un léger magnétisme rémanent. *La source du magnétisme terrestre*

démagnétisantes considérées ci-dessus augmentent et il s'établit l'équilibre que nous constatons. Si le Globe ne contenait pas de fer, la vie à sa surface aurait été rendue impossible par suite du bombardement causé par les électrons solaires.

Nous allons maintenant examiner rapidement quelques-uns des résultats obtenus au Scoresby Sund pendant l'Année Polaire à la lumière de cette



Fig. 55. — Curieux aspect du glacier Wegener en automne.

théorie. De ces résultats nous retiendrons seulement les plus importants concernant les aurores, l'ozone et les rayons cosmiques.

LES AURORES

L'observation des aurores a été faite depuis la mi-septembre 1932 jusqu'à la mi-avril 1933, d'une façon permanente, par quarts de trois heures auxquels ont participé douze membres de l'Expédition française. La veille, qui a atteint 17 heures sur 24 durant la nuit polaire, s'effectuait dans une tour hexagonale, édifiée sur le faîte du laboratoire, munie d'une ouverture centrale par laquelle l'observateur voyait le ciel à l'air libre, baigné dans un courant ascendant d'air chaud.

Par très mauvais temps, des observations spectroscopiques étaient encore possibles à travers six fenêtres obliques munies de doubles glaces chauffées électriquement. La position des phénomènes lumineux était repérée par rap-

ainsi que par rapport aux étoiles. Leur intensité était chiffrée selon la notation internationale (0 à 4), 1 correspondant à l'apparition de lueurs juste visibles (10^{-8} bougies/cm^2), 4 à celle de lueurs brillantes et colorées (10^{-4} bougies/cm^2). Durant 2 700 heures de veille plus de dix mille observations distinctes ont été notées.

La statistique montre que l'aurore a été quasi permanente durant l'Année Polaire Aurorale. Toutes les formes ont été observées, toujours sensiblement orientées de l'Est à l'Ouest magnétiques. La fréquence d'apparition montre que le Scoresby Sund était au Nord de la zone aurorale.

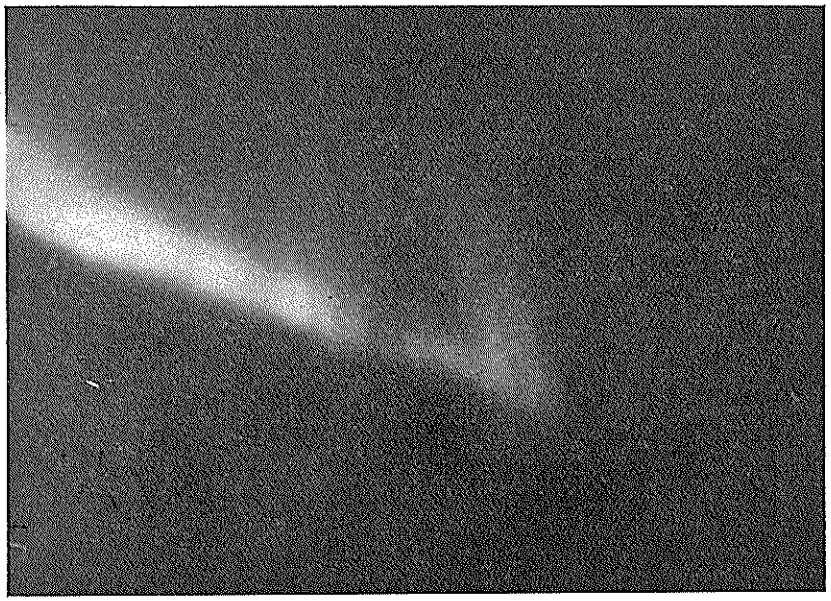


Fig. 56. — Draperie montrant l'existence accidentelle d'une couche stratosphérique absorbante.

Les très fortes aurores de la fin de février ont montré le processus d'évolution régulier du phénomène. Celui-ci débutait au S.-E. au-dessus de l'Islande, passait au zénith une demi-heure plus tard et disparaissait en s'affaiblissant au N.-O. Les rayons avaient la même inclinaison que les lignes de force magnétique à 1 degré près. Celles-ci, vues au zénith, sont souvent animées d'un mouvement de rotation rapide (1/10 sec.) dans le sens inverse à celui des aiguilles d'une montre. Ce tournoiement résulte de l'amplification des mouvements d'ondulation des draperies dégénérant en tourbillons isolés.

Photographie. — Plusieurs centaines de clichés, posés environ une

accidentelle de couches stratosphériques absorbantes, dont le bord supérieur atteindrait 130 kilomètres, et qui sont, peut-être, à rapprocher des arcs crépusculaires de haute altitude (fig. 56).

A. Wegener, durant ses hivernages à Danmarks Havn en 1906-1908, avait pu observer la lumière zodiacale et plusieurs arcs crépusculaires dont le plus élevé atteignait 600 kilomètres d'altitude. Par suite de l'emplacement défavorable de la station, dont les horizons nord et est étaient mal dégagés, je n'ai malheureusement pu observer ces phénomènes.

Enregistrement photoélectrique des aurores polaires. — J'ai réussi à établir, au Scoresby Sund, un appareil enregistreur des aurores (*C. R.*, t. 197, p. 780, octobre 1933). Il comportait un système optique collecteur formé de lentilles à échelons de 30 centimètres d'ouverture, associé à une cellule géante au potassium, à vide, couplée avec un amplificateur à triodes. Un diaphragme rotatif interceptait le flux lumineux à une basse fréquence et le courant amplifié était enregistré par un microampèremètre à plume donnant un tracé continu.

L'appareil a décelé des aurores même invisibles, par temps de brouillard ainsi qu'à l'aube et au crépuscule. Il a montré que l'intensité des phénomènes lumineux pouvait varier dans la proportion de 1 à 10^4. Il permet aussi la comparaison précise des courbes magnétiques et aurorales.

Le fait de pouvoir dorénavant enregistrer quantitativement un phénomène jusqu'alors seulement apprécié visuellement d'une manière empirique, fera sans doute faire de très grands progrès à nos connaissances sur ce sujet.

Variation diurne. — La statistique horaire, portant sur les 157 aurores les plus caractéristiques, montre une variation diurne très accentuée, avec un maximum principal étalé sur deux heures, à 21 heures (temps local) et un maximum secondaire aigu à 4 h. 1/2. La fréquence aux époques extrêmes (15 h. 1/2 et 7 h. 1/2) est dix fois plus faible qu'à l'époque du maximum.

Si l'on divise la journée en deux périodes de 12 heures (temps de Greenwich) la fréquence aurorale est sensiblement la même durant les deux moitiés. Cette variation diurne est plutôt le résultat du déplacement géographique des arcs, signalé plus haut, qu'une réelle variation locale d'intensité. Elle semble due à la déformation de l'ionosphère sous l'effet de la pression de la radiation solaire (queue cométaire terrestre).

Activité aurorale. — Si l'on estime, selon l'échelle précitée (de 0 à 4), l'activité aurorale moyenne durant chacune de ces périodes de 12 heures, on peut

Cette courbe (fig. 57), qui est en parfait accord avec celle de l'agitation magnétique, établie au moyen des mêmes coefficients, d'après l'inspection des enregistrements magnétiques, montre une variation confuse durant le dernier trimestre de 1932. Durant le premier trimestre de 1933, au contraire, la courbe accuse une périodicité très nette coïncidant avec la période de rotation solaire de 27 jours. Mais, si l'on compare les courbes aurorale et magnétique à celle de l'activité solaire (exprimée en nombres de Wolf) il apparaît un phénomène remarquable : les deux courbes sont en opposition de phase.

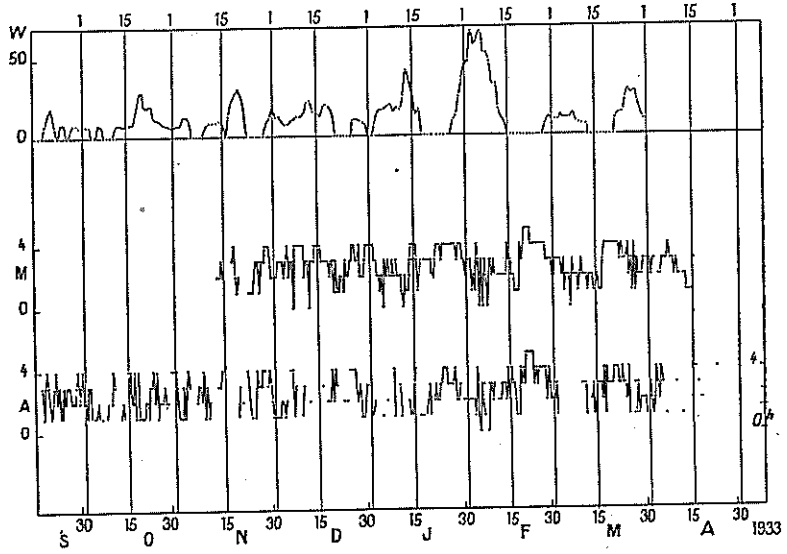


Fig. 57. — Variation des activités solaire, magnétique et aurorale pendant l'Année Polaire.

Cette périodicité est due à la présence, durant le premier trimestre de 1933, d'un foyer unique et intense (tache visible à l'œil nu, latitude + 10°, longitude 315°, rotation 1061) d'activité sur le Soleil, ayant évolué durant trois rotations en présentant un fort maximum (67) pendant la première quinzaine de février. Or, c'est à cette époque qu'ont été observées les deux seules périodes d'activité aurorale nulle de l'année. Au contraire, durant la seconde quinzaine, alors que l'activité solaire était nulle, des aurores exceptionnellement intenses, les plus fortes de l'année, ont été observées (20, 21, 22 février).

Des décalages dans le temps de quelques dizaines d'heures, par rapport au passage d'un foyer d'activité solaire par le méridien central, ont souvent été signalés, mais c'est la première fois qu'un décalage d'une demi-période

théories attribuant les phénomènes auroraux et magnétiques à l'émission par le Soleil de rayons hertziens ou ultra-violets, ou attribuant les retards constatés à une durée de propagation de corpuscules électrisés, mais il prouve que ce sont bien les jets coronaux déliés équatoriaux qui sont la seule cause de ces phénomènes. Le résultat est à rapprocher de l'observation de Perrine, qui, lors de l'éclipse de 1901 (minimum), n'a observé qu'un seul jet coronal associé à une tache solaire unique.

L'étude des éclipses a, en effet, montré que les jets coronaux les plus



Fig. 58. — Le traîneau esquimau et son attelage.

intenses n'étaient pas radiaux et qu'ils prenaient naissance, non sur les bords du disque solaire, mais en avant ou en arrière de celui-ci. En période de minimum solaire, les jets électroniques déliés, provenant du foyer d'activité, ont une énergie assez réduite pour être courbés par le champ magnétique solaire de Deslandres au point de rencontrer la Terre à l'opposé de leur direction d'émission. Leur trajectoire ressemble ainsi à une sorte de queue cométaire, diffuse et recourbée en arrière de son foyer d'émission.

La théorie reçoit ainsi une confirmation inattendue. On aurait pu craindre qu'une Année Polaire effectuée en période de minimum solaire fût plus pauvre en résultats qu'en période de maximum. Il n'en est rien : la simplification des phénomènes causée par leur rareté, jointe à la chance exceptionnelle

LES AURORES PLANÉTAIRES

L'aurore ne saurait être un phénomène exclusivement terrestre. Il est évident que toute planète douée d'une atmosphère même très raréfiée, et d'une densité suffisante pour contenir du fer et acquérir un moment magnétique, doit en présenter, d'autant plus intenses, qu'elle sera plus proche du

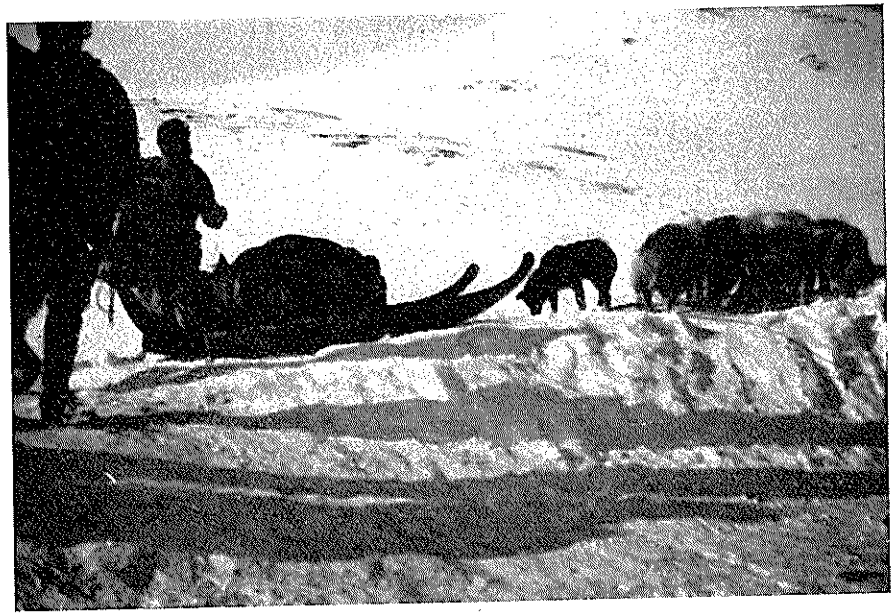


Fig. 59. — Départ pour la chasse.

Soleil. La lumière irrégulièrement cendrée de Vénus n'aurait-elle pas cette origine ?

AURORES ET ÉTOILES FILANTES

Il est à remarquer que les aurores et les étoiles filantes, étant des phénomènes lumineux se produisant dans la haute atmosphère à des altitudes du même ordre, doivent présenter des analogies. Il est bien connu que la trajectoire de certains météores persiste parfois durant plusieurs minutes en s'éteignant progressivement, se diffusant, se déformant et brillant d'une vive phosphorescence verte. Ce sont là tous les caractères de la lumière aurorale. Ces observations confirment, tout d'abord, l'agitation considérable dont la haute atmosphère est parfois le siège. Contrairement aux idées courantes, les vents augmentent toujours d'intensité lorsqu'on s'élève en altitude et,

sphère. Cette agitation explique pourquoi la pression ne décroît plus à ces altitudes suivant la loi de Laplace, mais beaucoup plus lentement. Elle rend compte de la constance de la composition de l'air stratosphérique et de la vitesse de chute de l'ozone.

Si la lumière verte éclatante des trajectoires de certaines météorites est bien due à la raie aurorale 5577 Å, elle est due à l'excitation de l'oxygène par des électrons ionisants issus du bolide.

La vitesse de celui-ci étant beaucoup plus grande que celle des molécules, toutes celles qui sont rencontrées sont captées et forment un matelas

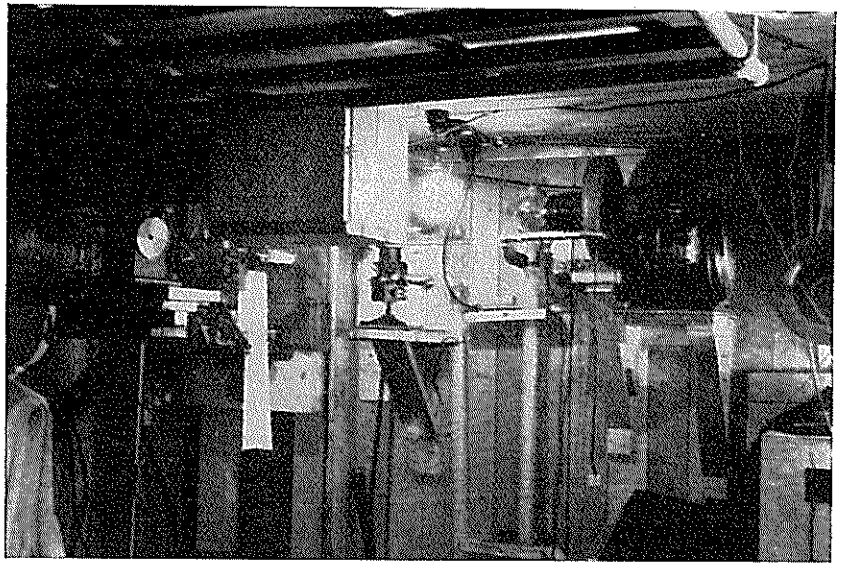


Fig. 60. — Les appareils d'absorption de l'ozone atmosphérique au Scoresby Sund.

gazeux de grande densité sur sa surface frontale, matelas bombardé — avec la vitesse de propagation — par les molécules ultérieurement rencontrées. Cette énergie étant transformée en chaleur, le matelas gazeux est porté à une très haute température et émet un rayonnement ionisant. Les électrons lents émis sont accélérés dans le champ électrique résultant de la présence des ions positifs formés et leur pouvoir de pénétration mesure le diamètre, souvent fort large, de la traînée phosphorescente. La lueur persistante doit donc présenter tous les caractères d'un rayon intense d'aurore polaire.

L'ORIGINE DE L'OZONE ATMOSPHÉRIQUE

rieur était aspiré (fig. 60), d'une manière continue, à travers une solution d'arsénite de sodium titrée. L'excès d'arsénite était dosé par une solution d'iode (1).

Le résultat de ces dosages est des plus frappant (fig. 61). En novembre, la teneur de l'air en ozone n'est que de 5 milligrammes par 100 mètres cubes, c'est-à-dire du même ordre de grandeur qu'en France, mais dès le début de la nuit polaire, la concentration croît jusqu'à la vitesse maxima de 10 à 15 milligrammes par 24 heures. Les grandes tourmentes polaires, qui s'ac-

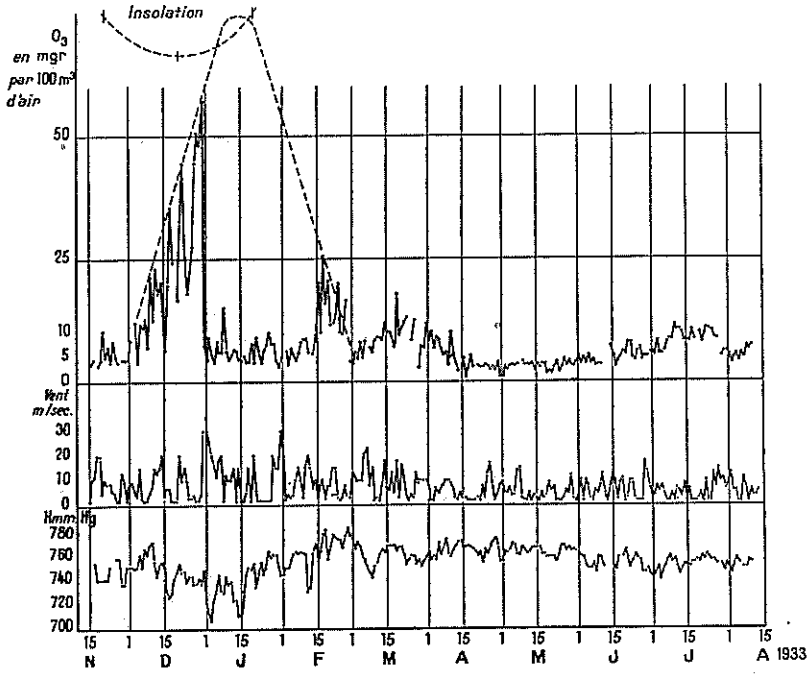


Fig. 61. — Variation de la teneur en ozone de l'air atmosphérique au Scoresby Sund. Variation du vent et de la pression atmosphérique.

compagnent de vents violents (45 m/sec) venant du Nord-Est, c'est-à-dire du Nord de la zone aurorale — chassent cet ozone. Ces coups de vent compliquent l'interprétation de la courbe, mais il est clair que celle-ci, par temps calme et beau, présenterait un maximum un mois après le solstice, avec une concentration de l'ordre de 1 milligramme par mètre cube d'air, c'est-à-dire 50 fois plus que sous nos latitudes. Dès le début de mars, au contraire, et jusqu'en août, la concentration tombe à la même valeur qu'en novembre.

Ces résultats semblent donc bien prouver que l'ozone atmosphérique est dû, non au rayonnement ultra-violet du Soleil, selon les idées courantes,

mais, conformément à la théorie, à l'aurore polaire et qu'il est détruit par le rayonnement solaire. Le décalage d'un mois montré par la courbe, par rapport au solstice d'hiver, mesure le temps de chute du gaz lourd depuis le lieu de sa production jusqu'au sol. Cette chute est d'ailleurs probablement fortement accélérée par le brassage dont la stratosphère est le siège.

ACTIVITÉ AURORALE ET MÉTÉOROLOGIE

Soutenant une hypothèse ingénieuse, M. Levine (*C. R.*, t. 176, p. 705, mars 1923) a attribué la formation des cyclones à une polymérisation des

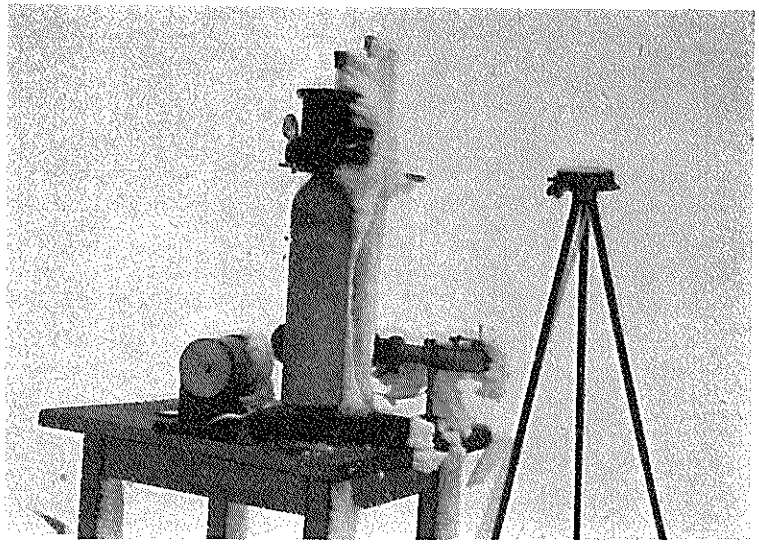


Fig. 62. — Chambre d'ionisation à haute pression d'argon et électromètre dans le vide pour la mesure des rayons cosmiques.

gaz de la haute atmosphère ($30^2 \rightarrow 20^3$) sous des influences électriques. Il serait séduisant de rattacher la formation des dépressions de l'activité aurorale. Malheureusement, les observations faites au Scoresby Sund ne justifient nullement cette hypothèse. La cause des dépressions est encore plus obscure et plus indirecte. Les pressions régnant d'ailleurs à l'altitude des aurores sont tout à fait négligeables devant les dépressions observées au sol.

LES RAYONS COSMIQUES

J'ai étudié les rayons cosmiques au Scoresby Sund au moyen de l'appareil de Kolhörster et d'un appareil construit spécialement dans ce but. L'ap-

breux points du Globe. Malheureusement, le principe de sa construction fait que son zéro (dû à l'ionisation parasite interne, d'origine radioactive) est fort élevé (1/3), ce qui réduit sa sensibilité réelle.

Les appareils que j'ai établis présentent un très faible zéro (3 p. 100) et une précision équivalente (2 p. 100). Ils sont transportables et légers. Ils comportent (fig. 62) une chambre d'ionisation en duralumin avec grille interne et furent remplis *d'argon pur*, sous la pression de cent atmosphères, grâce au concours de M. G. Claude. L'électrode axiale est isolée et portée par un bouchon conique d'ambre ou de silice, avec ou sans dispositif de garde. Tous les masticages sont exécutés à chaud avec de la picéine. L'une de ces chambres d'ionisation porte un électromètre de Szilard à aiguille, à lecture directe, disposé dans le vide. Cette disposition assure un isolement invariable et un très faible zéro, par suite de la suppression de l'ionisation parasite due aux rayons α dans la cage de l'électromètre.

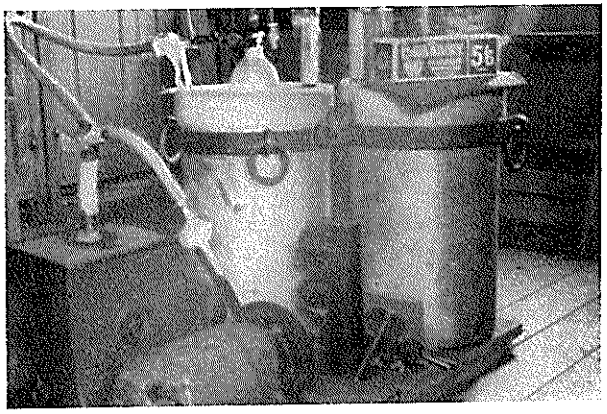


Fig. 63. — Les chambres d'ionisation à haute pression dans leur blindage de zinc.

La seconde de ces chambres est connectée avec un électromètre de Lindemann ou à un dispositif enregistreur. Ces récipients peuvent être disposés dans des blindages (fig. 63) en zinc pur électrolytique (99,97 p. 100 Zn) de 10 centimètres d'épaisseur, destinés à absorber les rayons gamma issus du sol. Cette ionisation parasite était presque aussi élevée que celle due aux rayons cosmiques, aussi bien à bord du « Pollux », navire en fer de 3 000 tonnes, que sur le gneiss du Scoresby Sund sur lequel était édifié le laboratoire.

Cette ionisation parasite rend très difficiles les mesures absolues effectuées sans blindage. J'ai pu cependant en exécuter une sur un glacier (fig. 64) bien dégagé (Hvide Fjeld) à l'altitude de 800 mètres sur une épaisseur de glace de 65 mètres. L'appareil avait été préalablement étalonné par Kolhörster à Potsdam, et le zéro observé dans une mine de sel sous blindage. J'ai effectué des mesures horaires pendant 36 heures consécutives. Ces mesures présen-

niveau de la mer, sous la pression de 760 millimètres et à la température de 0° C.



Fig. 64. — Mesure des rayons cosmiques sur le Hvide Fjeld (altitude 800 mètres).

La plus récente valeur trouvée par Millikan près de Pasadena au niveau de la mer, est J = 2,48 avec un appareil différent (24° C, 740 millimètres).

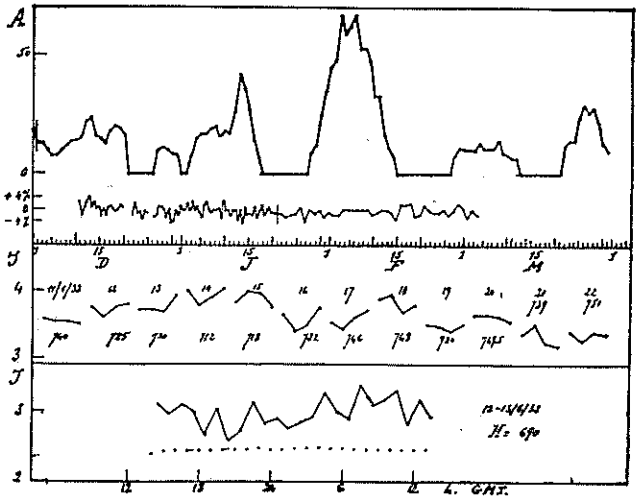


Fig. 65. — Variations de l'activité solaire et de l'activité cosmique. Fluctuations horaires de l'intensité des rayons cosmiques.

les appareils dans un long tunnel à température constante creusé dans un névé attenant au laboratoire. Les chambres d'ionisation étaient ainsi entourées de toutes parts d'une épaisseur de neige inactive (densité 1/2) d'environ 2 mètres. Grâce aux tourmentes d'hiver, pendant lesquelles la pression barométrique varie de près de 10 p. 100 (704-782 millimètres), il fut possible de mettre en évidence l'effet barométrique d'une façon très nette. On obtient même ainsi une fraction notable de la courbe d'absorption dans l'atmosphère.

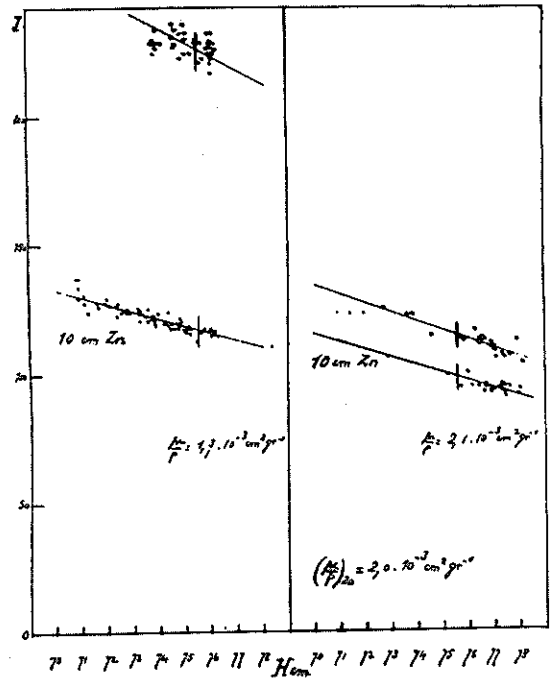


Fig. 66. — Effets barométriques observés avec le blindage de zinc dans le laboratoire et dans la grotte de neige.

La variation trouvée atteint $2 \cdot 10^{-3}$ par millimètre de mercure, ce qui donne un coefficient d'absorption $\frac{\mu}{\rho} = 2{,}0 \cdot 10^{-3}$ cm²/gr, en accord avec la valeur trouvée par Millikan pour l'air et par Büttner pour la glace. Mais, la comparaison directe des courbes d'absorption atmosphérique obtenues, avec ou sans blindage de zinc, montre (fig. 66) que les coefficients d'absorption massiques de l'air et du zinc sont égaux, comme on le constate pour les rayons gamma. Ce résultat plaiderait en faveur de l'hypothèse d'après laquelle les rayons cosmiques sont des photons. Il serait intéressant de mesurer ces coefficients en période de maximum solaire.

AURORES POLAIRES ET RAYONS COSMIQUES

Observations faites au Scoresby Sund pendant l'Année Polaire

(*suite et fin*) [1]

Les mesures effectuées entre Brest et le Scoresby Sund n'ont pas montré de variation d'intensité systématique à ± 3 p. 100 près. On sait, au contraire, que les mesures de Clay, puis, plus récemment, de Compton et de ses collaborateurs, ont montré un minimum à l'équateur magnétique d'autant plus accentué que l'altitude était plus élevée. En outre, Hess et ses collaborateurs ont mis en évidence, et pour la première fois avec certitude, une variation diurne solaire, le maximum ayant lieu vers 14 heures (temps local). Une petite influence de l'activité solaire est encore discutée.



Fig. 75. — Sur le Hvide Fjeld au printemps.

Tous ces résultats récents semblent prouver que les rayons cosmiques — aux grandes distances de la Terre — sont électroniques, c'est-à-dire sensibles au champ magnétique terrestre, qu'ils traversent l'atmosphère sous forme de photons et que la source initiale en est le Soleil, en accord sur tous les points avec la présente théorie.

LES DEUX COURONNES SOLAIRES

J'ai étudié, avec le plus grand soin, les variations de l'activité cosmique avec le temps. Les mesures étaient effectuées avec la chambre à haute pression dans la grotte de neige, avec ou sans blindage de zinc. Les lectures faites toutes les 12 heures donnaient l'activité moyenne durant chacune de ces périodes. Les valeurs corrigées de l'effet barométrique montrent des fluctuations atteignant ± 4 p. 100, sans rapport avec les activités solaire ou

saisonnière ne put être observée, par suite de l'ensevelissement progressif du laboratoire sous la neige, ce qui réduisait l'angle solide de rayonnement cosmique reçu. En un mot, l'activité cosmique au sol ne dépend pas, à 2 p. 100 près, de l'activité aurorale ou solaire, et nous touchons ici a contradiction apparente signalée dès le début de cette étude. Des mesures récentes de Hess (*Nature*, 4 nov. 1933) montrent toutefois que l'intensité des rayons cosmiques mous peut varier de 15 p. 100 à 15 kilomètres d'altitude.

Il faut tout d'abord remarquer que l'aurore polaire, observée en un point du Globe, est un phénomène très local, intéressant des régions très restreintes

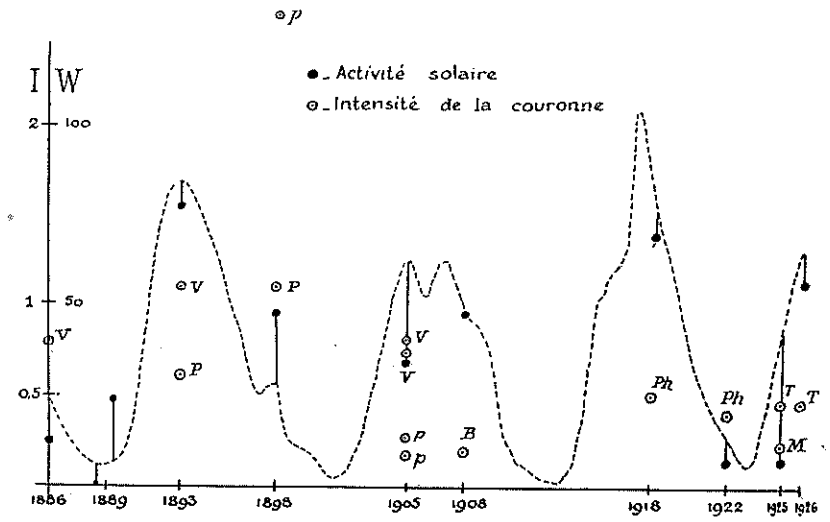


Fig. 76. — Constance de l'intensité de la couronne en fonction de l'activité solaire.

de l'espace, relativement très proches du sol, et ne durant en général, avec intensité, qu'un temps très court. Il serait déjà plus logique de comparer l'activité cosmique avec l'activité aurorale non polaire intégrée sur toute la Terre ou avec l'agitation magnétique mondiale.

L'activité solaire, d'autre part, est caractérisée par une formule arbitraire et les nombres de Wolf ne mesurent nullement l'intensité de l'émission électronique du Soleil. Nous observons ainsi divers phénomènes : les rayons cosmiques, la lumière zodiacale, qui semblent presque constants et qui intéressent, à l'inverse des premiers, un volume énorme de l'espace, celui de toute l'atmosphère terrestre. Ces phénomènes sont à rapprocher de l'intensité lumineuse du Soleil qui, comme la « constante solaire », est invariable et indépendante de l'activité solaire.

durant les éclipses. Nous possédons d'assez nombreuses mesures de ce genre, effectuées par des méthodes très diverses, depuis 1886 jusqu'en 1926. Or, il est très remarquable de constater que les valeurs obtenues à des époques d'activité solaire très variable, montrent une intensité presque constante, soit environ la moitié de l'intensité lumineuse de la pleine Lune. Sur la figure 76 j'ai porté, pour cette période, la variation de l'activité solaire en nombres de Wolf (courbe continue) et, mieux, l'activité solaire le jour de chaque éclipse, grâce aux nombres aimablement communiqués par M. Brunner. Les mesures récentes photoélectriques (1918 et 1922), électrothermiques (1925 et 1926), montrent une constance remarquable, bien que l'activité ait varié de 1 à 10.

Cette quasi-constance de l'émissivité électronique globale du Soleil, prouve que les jets coronaux déliés de grande densité auxquels on doit les aurores ont une intensité relativement faible. Il existe aussi une différence d'énergie entre ces jets, localisés vers l'équateur, et qui forment une partie de la couronne extérieure et ceux qui constituent l'ensemble de la couronne intérieure. En effet, les jets polaires suivent les lignes de force du champ magnétique solaire, tandis que les jets équatoriaux sont, comme nous l'avons vu, relativement peu déviés. Cette grande différence dans les rayons de courbure prouve des différences au moins locales d'intensité du champ électrique chromosphérique aux pôles et à l'équateur. Ces phénomènes nous font donc pénétrer plus en avant dans la théorie en nous faisant distinguer deux sortes de jets coronaux qui se rapportent aux deux couronnes, depuis longtemps distinguées par les astronomes.

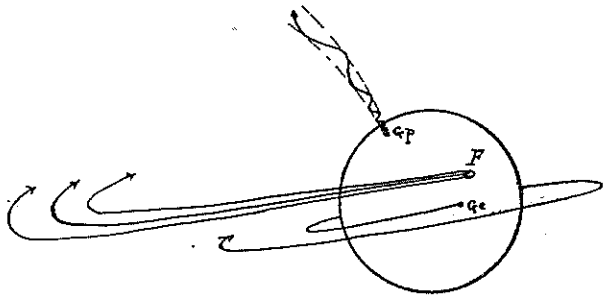


Fig. 77. — Trajectoires des électrons constituant les deux couronnes solaires.

Les jets équatoriaux de la couronne intérieure, associés aux grains de riz, d'une intensité globale presque constante et composant la plus grande partie de l'émission solaire, seraient responsables de la lumière zodiacale, de la production de l'aurore non polaire et des rayons cosmiques, dans tout le volume de l'atmosphère — c'est-à-dire jusqu'à des distances de 6,6 rayons terrestres. Ces jets, plus déviables dans le champ terrestre, ne peuvent s'approcher près du Globe. La source des rayons cosmiques serait ainsi localisée entre un et

D'autre part, les jets déliés équatoriaux associés aux facules, d'une intensité négligeable devant l'ensemble des premières, seraient seuls responsables des aurores polaires et des perturbations magnétiques. Ces jets, de plus grande énergie, s'approcheraient des pôles aussi près qu'un rayon terrestre.

Pour préciser ces idées, schématisons (fig. 77) quelques trajectoires électroniques solaires. Le jet issu de la facule F, qui atteint directement la Terre, aura, au voisinage du Soleil, un rayon de courbure de l'ordre de 10 rayons solaires, tandis que celui issu du grain de riz équatorial en aura un juste un peu supérieur au rayon. Son énergie serait donc de l'ordre de 10^9 volts et le champ équatorial solaire serait voisin de 10^{-4} gauss, valeur beaucoup plus grande que celle observée par Deslandres (10^{-7} gauss) par la courbure des protubérances. La trajectoire électronique issue du grain de riz polaire G*p* aura un rayon de courbure beaucoup plus faible pour des raisons qui ne nous intéressent pas directement ici.

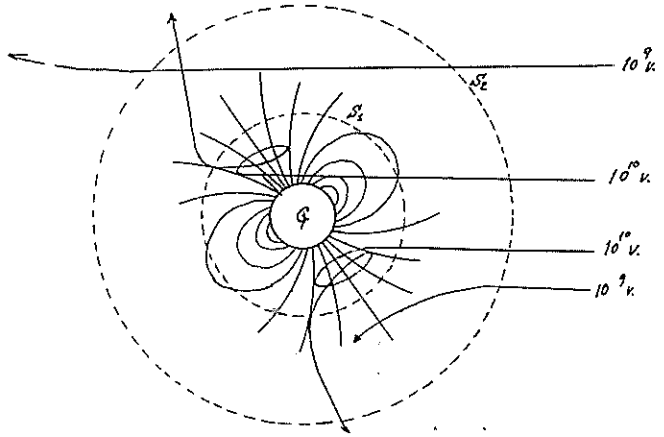


Fig. 78. — Trajectoires des électrons solaires équatoriaux appartenant aux couronnes interne et externe dans le champ magnétique de la Terre. Les premiers, de moindre énergie, produisent les rayons cosmiques aux confins de l'atmosphère ; les seconds, s'enroulant plus près du sol, produisent les aurores polaires et des perturbations magnétiques.

Ce mélange de peu d'électrons de 10^{10} volts avec beaucoup d'électrons de 10^9 volts, se triera dans le champ magnétique de la Terre (fig. 78). Les seconds, plus déviables, ne pourront s'approcher du sol et se propageront dans le volume compris entre les sphères S_1 et S_2, cette dernière marquant la limite de l'atmosphère. Ils y produiront les rayons cosmiques. Les seconds pourront s'enrouler au voisinage des pôles où ils exciteront une abondante production d'électrons secondaires en donnant naissance aux aurores et aux perturbations magnétiques. L'excès de rayons cosmiques arrivant dans les régions tempérées et polaires sera donc relativement faible, et l'intensité de ces rayons sera presque indépendante de l'activité solaire.

La propagation des jets coronaux. — On sait que Shuster, puis Lin-

sées du même signe, de se propager du Soleil jusqu'à la Terre, sans être dissocié par répulsion électrostatique.

La démonstration est, en effet, correcte, si l'on imagine un faisceau cathodique se propageant dans le vide. Mais les jets coronaux sont, comme nous l'avons vu, d'une densité électrostatique prodigieusement faible et ils se propagent, non dans le vide, mais dans un milieu extrêmement raréfié *d'atomes ionisés* par les rayons ultra-violets, c'est-à-dire d'ions positifs. Les étoiles perdent en effet peu à peu leur substance sous forme de protubérances, les planètes leur atmosphère, les météorites leurs gaz occlus (comètes). L'observation montre dans l'espace cosmique la présence de nuages de calcium et d'hydrogène. Les queues cométaires y décèlent de l'oxyde de carbone, etc. Or, par suite de la très grande différence de mobilité entre les ions positifs et les électrons, il suffit d'un très petit nombre des premiers — qui peuvent être considérés comme étant au repos — pour neutraliser la charge spatiale d'un grand nombre des seconds.

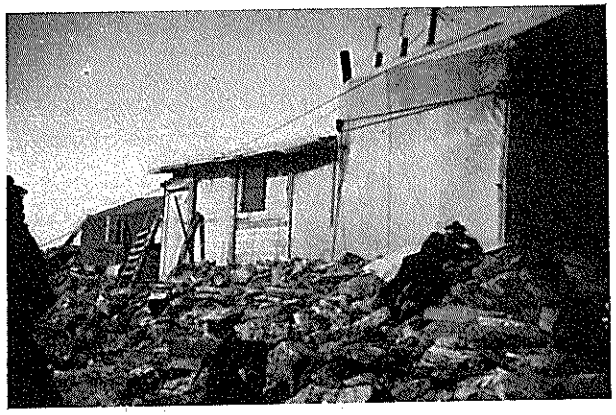


Fig. 79. — La station de montagne en été.

La propagation de jets électrisés du Soleil jusqu'à la Terre nous paraît d'ailleurs être un fait d'observation. L'aurore exceptionnelle du 21 février dernier s'est répétée trois jours consécutifs. La largeur du faisceau ayant rencontré la Terre était donc de : $3 \times 24 \times 3\,600 \times 400$, soit 10^8 kilomètres. Si la région faculaire active avait seulement un diamètre dix fois plus grand que celui du Globe, soit 10^5 kilomètres, on voit que le faisceau s'était élargi mille fois avant d'atteindre la Terre. Cet élargissement ne semble pas dû à une dispersion spectrale dans le champ de Deslandres, par suite de l'aspect symétrique de la courbe d'activité aurorale.

Mais une preuve directe de la propagation de faisceaux déliés peut être tirée de l'observation des éclipses. Des filaments cororaux ont été suivis par Bergstrand jusqu'à une distance du Soleil atteignant dix fois son rayon. Voilà donc des faisceaux cathodiques encore nets après un trajet dans l'es-

fois plus éloignée et il paraît certain que les jets auront encore conservé leur individualité lorsqu'ils la rencontreront.

Nous n'avons considéré dans cette étude que des électrons solaires. Toutes les énergies que nous connaissons sur la Terre proviennent, en effet, directement ou non, à peu près uniquement du Soleil. Cependant, les étoiles géantes doivent émettre des électrons d'une énergie encore beaucoup plus grande et avec une bien plus grande abondance. Ces corpuscules seraient susceptibles d'exciter dans notre atmosphère, et même à la surface du Globe, des rayonnements encore plus pénétrants, quoique beaucoup plus faibles.

CONCLUSIONS

La théorie dont les grandes lignes ont été esquissées au début de cette étude est confirmée par les observations faites au Scoresby Sund. C'est pour moi un agréable devoir de remercier tous ceux dont le concours m'a permis de mener à bien ces observations, en particulier M. Fabry, qui m'a aimablement proposé un crédit ayant permis l'étude de l'ozone et des rayons cosmiques. Les travaux de l'Expédition française de l'Année Polaire ont pu être exécutés grâce à d'innombrables efforts, au premier rang desquels il faut citer celui accompli par notre Marine. Enfin, si le programme de l'Expédition a été intégralement rempli, c'est grâce à l'énergie et au talent d'organisateur de son jeune chef, le lieutenant de vaisseau Habert, et au dévouement des membres de l'équipage, pour lesquels le séjour fut naturellement plus pénible que pour nous.

A. DAUVILLIER
Docteur ès-Sciences.