

<b>Zeitschrift:</b>	Archives des sciences physiques et naturelles
<b>Herausgeber:</b>	Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
<b>Band:</b>	41 (1916)
<b>Artikel:</b>	Les rayons corpusculaires du soleil qui pénètrent dans l'atmosphère terrestre sont-ils négatifs ou positifs? [suite]
<b>Autor:</b>	Birkeland, K.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-742630">https://doi.org/10.5169/seals-742630</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 07.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

LES

# RAYONS CORPUSCULAIRES DU SOLEIL

QUI PÉNÈTRENT DANS L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE

## SONT-ILS NÉGATIFS OU POSITIFS ?

PAR

**K. BIRKELAND**

(Suite<sup>1)</sup>)

---

*Calcul de l'énergie émise par la précipitation corpusculaire  
pendant un fort orage magnétique*

§ 6. Nous allons chercher à calculer maintenant une limite inférieure de l'énergie cinétique d'une précipitation de rayons dans la zone aurorale, causant un fort orage magnétique.

Comme nous le verrons, on peut obtenir une approximation suffisante grâce aux recherches faites en 1902-1903, et l'on arrive à ce résultat surprenant que la quantité d'énergie due à des rayons corpusculaires et se faisant sentir pendant un fort orage, est comparable et même supérieure à l'insolation totale de la chaleur ordinaire du soleil sur toute la terre pendant le même temps. Par le calcul, nous faisons l'hypothèse suivante, avec laquelle nous obtenons une limite seulement un peu inférieure pour l'énergie cinétique du courant corpusculaire. Nous trouvons d'abord la position dans l'espace et l'intensité d'un courant linéaire hypothétique, produisant les mêmes effets magnétiques que ceux observés dans la région où l'orage polaire est le plus puissant. Nous supposons alors que les corpuscules

<sup>1)</sup> Voir *Archives*, t. XLI, p. 22.

du courant de rayons cheminent parallèlement et à peu de distance du courant hypothétique ; il devient alors évident, si l'on se reporte aux considérations données dans l'article 36, A. P., p. 99 et 105 que nous obtenons une limite inférieure un peu moindre pour la somme d'énergie du courant corpusculaire.

Lorsque notre système corpusculaire se meut avec une vitesse ordinaire de translation, l'énergie électromagnétique, pour autant qu'elle dépend du mouvement, sera faite de composantes appartenant chacune à un électron, de telle sorte que pour de faibles vitesses elle pourra être représentée par

$$\sum \frac{1}{2} m'v^2 .$$

Grâce à leur extrême petitesse, on peut supposer dans ce cas que les électrons se trouvent assez loin les uns des autres pour que leurs champs n'empêtent pas les uns sur les autres.

Soit  $n$  le nombre de corpuscules qui traversent la section transversale dans l'unité de temps,  $m$  la masse apparente d'une particule et  $v$  la vitesse, l'énergie cinétique  $w$  sera donnée par :

$$w = \frac{1}{2} nmv^2 .$$

Si chaque particule porte une charge de  $e$  unités électrostatiques nous aurons pour une intensité  $i$  du courant :

$$i = \frac{en}{3 \times 10^9} \text{ ampères} .$$

Et ainsi :

$$w = \frac{3}{2} \times 10^9 \cdot i \cdot \frac{m}{e} \cdot v^2 .$$

S'il s'agit d'unités C. G. S.  $w$  sera exprimé en ergs par seconde. Cette énergie du courant dépendra beaucoup plus de la nature des rayons que du courant lui-même. Dans le cas particulier les rayons sont très puissants et nous avons trouvé pour les rayons qui descendent dans la zone aurorale  $H \cdot \rho = 3 \times 10^6$ .

Introduisons ici pour  $m$  l'expression donnée par Lorentz pour la masse longitudinale : <sup>(1)</sup>

$$m = \left( 1 - \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} \cdot m_0 ,$$

<sup>1)</sup> Lorentz, Theory of Electrons. p. 212.

où  $m_0$  désigne la masse d'un électron lent et  $e$  la vitesse de la lumière.

Il est possible qu'on ne puisse appliquer rigoureusement les formules de Lorentz pour le cas extrême que nous considérons, soit pour des rayons d'une puissance inconnue jusqu'à présent, mais j'estime que nous ne pouvons choisir autrement.

Pour des électrons se mouvant lentement nous avons :

$$\frac{e}{m_0} = 540 \times 10^{15},$$

d'où :

$$w = \frac{3}{2} \times 10^9 \cdot i \cdot \frac{\left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right)^{-\frac{3}{2}}}{540 \times 10^{15}} \cdot v^2 \text{ erg/sec.}$$

Mais la valeur de  $v$  se rapproche tellement de celle de  $c$  (vitesse de la lumière) que nous pouvons remplacer  $v^2$  par  $c^2$ .

J'ai déjà calculé l'expression suivante qui correspond à nos rayons héliocathodiques :

$$\frac{v}{c} \left(1 - \frac{v}{c}\right)^2 = 1,82 \times 10^{-3}, \quad (\text{A. P.}), \text{ p. 596}$$

d'où :

$$w = \frac{3}{2} \times 10^{22} \cdot i \cdot \text{erg/sec.}$$

En supposant pour  $i$  la valeur  $10^6$  ampères comme nous l'avons trouvé pour des orages magnétiques polaires très puissants, nous aurons :

$$w = \frac{3}{2} \times 10^{28} \text{ erg/sec.},$$

ou

$$w = 2 \times 10^{18} \text{ HP}.$$

Si la formule pour  $m$  donne dans ce cas extrême une valeur trop élevée pour la masse longitudinale d'un électron, la somme totale d'énergie dans la précipitation corpusculaire sera aussi trop élevée.

Pendant un orage magnétique très violent, il passe sur la terre une quantité d'énergie colossale, mais à une altitude de 500 km. parce que la puissance des rayons est aussi forte qu'en ce moment.

On peut déduire de ce résultat qu'une grande tache solaire est susceptible d'émettre, pour des courtes périodes, une énergie sous forme de rayons corpusculaires qui sera plus grande que celle du rayonnement du soleil en lumière et chaleur pendant le même temps. Et nous pouvons conclure de l'intensité des orages polaires moyens (A. P., p. 538) qui donne la moyenne des orages par mes quatre stations, en 1902-1903, *que le soleil, en moyenne, émet davantage d'énergie sous forme de rayons corpusculaires que sous forme de lumière et de chaleur.*

Le disque permanent de rayons autour du soleil qui se manifeste comme lumière zodiacale comprend les rayons qui occasionnent les orages polaires et il est évident que ce disque représente, même maintenant, une quantité d'énergie qui étonne. Pour comparer, calculons maintenant l'insolation totale I de la terre, en prenant la constante solaire égale à 2 par minute. Nous obtenons :

$$I = 4,3 \times 10^{16} \text{ gram. cal. par sec. ,}$$

ce qui correspond à :

$$2,4 \times 10^{14} \text{ HP .}$$

Nous voyons par là que l'énergie d'une précipitation corpusculaire au cours d'un orage polaire peut facilement être du même ordre de grandeur que l'insolation totale de la terre et même beaucoup supérieure.

S'il était possible à cette énergie corpusculaire de pénétrer suffisamment profond dans notre atmosphère, dans une zone aurorale, nous n'obtiendrions pas seulement une température subtropicale dans la région polaire de la terre, mais il y aurait également une forte et abondante production d'azote dans l'atmosphère, ce qui constitue d'excellentes conditions pour une riche végétation.

D'après Arrhenius cette production est actuellement d'environ 400 millions de tonnes par année sur la surface de la terre et est due principalement aux éclairs. Si donc à n'importe quel moment le disque de rayons permanent autour du soleil contient des rayons d'une puissance telle que  $H_p = 10^7 \text{ C. A. S.}$  et d'une densité telle que pour notre forte précipitation polaire le

faisceau de rayons passe à 100 km. au-dessus de la terre, on aurait alors une grande masse de rayons qui pénétreraient plus profondément et qui produiraient les phénomènes auroraux les plus brillants d'une intensité inconnue jusqu'à présent ; les couches supérieures de l'atmosphère acquerraient une température colossale chaque jour, mais seulement du côté du couchant de la terre avec un maximum d'effet un peu après minuit. Cette précipitation occuperait une surface environ 15 fois plus grande que la zone aurorale actuelle. Il est possible d'expliquer de cette manière le climat chaud des régions polaires pendant la première période tertiaire. On peut de même expliquer que la végétation du Japon à cette époque démontre une température beaucoup plus froide que celle d'aujourd'hui, par le fait que ce pays est situé près de l'équateur magnétique et ne peut par conséquent bénéficier de l'énergie corpusculaire. L'insolation ordinaire du soleil a dû être plus faible qu'aujourd'hui parce qu'une forte quantité de lumière et de chaleur est maintenant absorbée par le voile épais qui entoure le soleil qui, à ce que je crois, est en relation étroite avec l'émanation corpusculaire du soleil. (A. P., p. 670).

Si nous admettons ainsi une densité énorme du disque des rayons autour du soleil, il est presque certain qu'au même moment l'insolation ordinaire sera fortement diminuée par l'absorption et la diffusion.

Essayons maintenant d'aller plus loin.

Après le climat subtropical dans le nord et le centre de l'Europe, il se produisit un abaissement général de la température, et l'on eut le grand âge glaciaire avec une marche en avant d'épaisses masses de glace provenant du pôle Nord et s'étendant jusqu'à de faibles latitudes. Ceux qui ont étudié l'époque glaciaire, ont reconnu qu'il y avait eu des avances et des retraits répétés des glaciers ou des couches de glace, qu'on attribue en général à des phases alternatives de climats rigoureux et plus doux. Les dépôts américains fournissent la preuve de six périodes distinctes de marche en avant séparées par des retraits de la glace et la croissance des végétaux sur des espaces qu'elle avait laissés libres.

Il est établi que quelques-unes de ces périodes interglaciaires

ont eu une durée extrêmement longue, probablement plus longue que celle qui sépare le dernier retrait de la glace de notre époque. On constatera, par conséquent, que la végétation de la période interglaciaire indique un climat doux, peu différent dans quelques cas de notre climat actuel.

En Europe, quelques savants pensent qu'il y a eu six périodes glaciaires, d'autres estiment qu'il n'y en a eu que trois.

Est-il possible maintenant de considérer nos rayons héliocathodiques comme la cause principale de ces remarquables changements de climat? Cette explication est certainement possible si nous pouvons admettre des changements à longue période dans la constitution électrique du soleil, analogues en quelque sorte à la période d'une tache solaire comme je me la représente, mais là, l'intervalle de temps entre les différentes phases est énorme.

Si nous supposons que le magnétisme du soleil, que je crois dû pour la plus grande partie à des courants corpusculaires circulaires en dehors du soleil, augmente, il arrivera finalement à un point critique auquel il se produira des phénomènes qui changeront rapidement la situation dans la manière dont les rayons corpusculaires atteignent la terre.

Pour des rayons héliocathodiques émis normalement de la surface du soleil, nous pouvons prouver que si les rayons atteignent une distance du centre du soleil supérieure à deux fois le rayon du soleil, ces rayons passeront à l'infini. Mais si cette variation reste toujours à une distance inférieure à  $2a$  du centre du soleil, nous devons avoir :

$$\sqrt{\frac{M}{H_0 \rho_0}} > 2a ,$$

où  $M$  est le moment magnétique du soleil, et  $a$  son rayon.  $H_0 \rho_0$  correspond aux rayons corpusculaires émanés (voir A. P., p. 617).

Si  $M$  est de l'ordre de grandeur  $10^{28}$  (voir mon calcul C. R., 24 janvier 1910), il s'en suit que  $H_0 \rho_0 > 5 \times 10^5$  pour des rayons partis normalement, si les rayons sont capables d'atteindre la terre et arrivent ensuite dans l'infini. Nous avons trouvé les conditions remplies, car des expériences et des observations,

nous déduisons :  $H_0 = 3 \times 10^6$  pour des rayons qui ont pénétré à l'intérieur de la zone aurorale.

Si maintenant le moment magnétique  $M$  du soleil augmente, il arriverait subitement un moment où le disque de rayons tout entier qui entoure le soleil disparaîtrait et les rayons circuleraient tout près de la surface du soleil ou y retourneraient. On suppose ici pour simplifier que tous les rayons corpusculaires du disque ont la même puissance.

Ce qui vient d'être dit, ne s'applique qu'aux rayons héliocathodiques. Avec des rayons atomiques, de la matière radiante et lorsqu'il faut considérer la gravitation, le résultat dans certains cas est un peu différent de celui obtenu dans A. P., p. 706.

Dans les expériences décrites dans l'A. P., nous avons une grande quantité de photographies représentant des phénomènes correspondant à des changements subits dans la distribution, comme nous l'avons mentionné ci-dessus.

Je n'en veux référer qu'à la figure 254, soit au cas de rayons apparaissant très loin de la sphère magnétique servant de cathode. Dans ce cas l'aimantation est faible ou les rayons sont très puissants.

Pour le cas inverse où l'aimantation est forte, nous avons les phénomènes de l'anneau de Saturne (fig. 255 c et fig. 257). L'anneau épais de lumière qu'on voit autour du globe cathodique (fig. 248 b et c) est aussi très intéressant; dans ce cas la décharge du courant est grande.

Lorsque l'aimantation de la sphère cathodique augmente, nous arrivons pour une intensité magnétique donnée à un changement brusque des phénomènes de la première espèce dans ceux de la seconde. Les expériences concordent absolument dans ce cas avec la théorie.

Il est facile aussi de trouver des photographies de nébuleuses qui semblent montrer ces deux classes d'émanation de rayons du corps central<sup>(1)</sup>.

La nébuleuse de la vierge N. G. C. 4594, représentée ci-dessous à la fig. 4, semble indiquer une émanation de rayons cathodiques et atomiques, — de matière radiante — d'une puissance

<sup>(1)</sup> Voir mon mémoire « De l'origine des mondes », *l. c.*

magnétique élevée, ou une radiation d'un corps central faiblement magnétique.

La déchirure sombre dans la nébuleuse peut être considérée comme due à l'effet d'une multitude de particules matérielles froides qui sortent du phénomène électro magnétique et forment écran. Les dernières se sont déjà retirées et se sont concentrées vers le corps central de matière radiante, agissant comme cathode.

La nébulose de l'Aquarius N. G. C. 7009, fig. 5, semble donner un exemple d'émanation des rayons de la seconde classe, où l'aimantation de la sphère radiante est relativement grande, ou peut-être sont-ce les rayons qui sont plus flexibles.

Les photographies de ces deux nébuleuses ont été prises à l'observatoire d'Helouan et le directeur a été assez aimable pour me permettre de les reproduire ici.

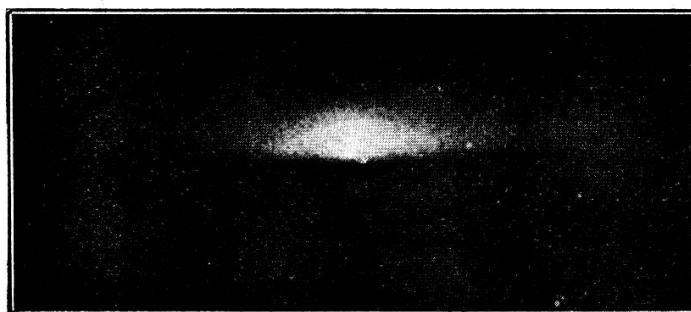


Fig. 4. — La nébuleuse de la Vierge.  
(N. G. C. 4594).

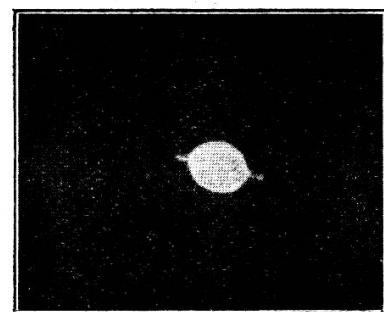


Fig. 5. — La nébuleuse d'Aquarius  
(N. G. C. 7009).

Qu'arriverait-il maintenant sur la terre, si tout d'un coup tous les rayons corpusculaires puissants que nous avons supposé avoir provoqué le climat subtropical dans le nord de l'Europe disparaissaient ? Si tout d'un coup le soleil forçait, par son aimantation, tous les rayons corpusculaires à circuler autour de lui à une faible distance, les régions polaires de la terre seraient beaucoup plus froides, et il serait même possible que les radiations de la lumière et de la chaleur soient considérablement diminuées, en supposant que le « voile sombre » devienne plus épais.

D'après les calculs faits par Pickering, Wilson, Schuster, Vogel, Seeliger et d'autres, le voile sombre absorberait maintenant une fraction importante ( $\frac{3}{4}$  à  $\frac{1}{3}$ ) des radiations de la lumière solaire, de telle sorte qu'une augmentation quelconque de l'absorption serait facilement sentie sur la terre.

Si, d'après ce que nous avons mentionné plus haut, les régions polaires de la terre étaient sensiblement refroidies, il se produirait une forte évaporation des eaux antérieurement chauffées de l'océan, spécialement dans les régions de l'équateur, qui amènerait les précipitations nécessaires pour les énormes formations de glace vers les pôles.

Si, de plus, nous pouvons supposer que l'aimantation du soleil a subi une variation périodique d'intensité, nous pourrions sans aucun doute donner une explication plausible pour les périodes glaciaires coupées de périodes à climat doux.

On pourrait obtenir des variations climatériques presque semblables en supposant que c'est la puissance des rayons corpusculaires qui a subi des variations périodiques et non l'aimantation du soleil. Mais il est certainement naturel de considérer notre première supposition comme la cause primordiale. En réalité, il est très probable que la puissance des rayons doit varier en même temps que l'aimantation du soleil.

Finalement, on pourrait admettre d'un autre côté que la cause principale ne doit pas être cherchée dans le soleil, mais dans des variations périodiques du magnétisme de la terre. Comme nous l'avons clairement démontré dans ce qui précède, la largeur de la zone aurorale sur la terre dépend dans une forte proportion de l'intensité du magnétisme terrestre.

Avec une aimantation trois fois supérieure à l'aimantation actuelle, aucun rayon héliocathodique de la valeur  $H_p = 3 \times 10^6$  ne pourrait pénétrer jusqu'à notre atmosphère ; si au contraire le magnétisme terrestre devenait trois fois moindre qu'il n'est actuellement, ces rayons pénétreraient très profondément et sur une surface 12 à 14 fois plus grande qu'actuellement.

Il est hors de doute que le magnétisme de la terre a subi de très grandes variations depuis la première période tertiaire, parce qu'il y a eu d'autres changements radicaux sur la terre

dans la même période. Mais mon opinion est qu'il est naturel de rapporter les causes premières des changements climatériques au soleil, parce que nous devons en tous cas supposer une densité des rayons héliocathodiques émis continuellement beaucoup plus forte qu'actuellement.

### *Théorie des voiles (rideaux) de la lumière du Nord*

§ 7. Abordons maintenant brièvement la discussion des récents essais de théories relatives aux voiles auroraux : il est nécessaire de le faire si nous voulons comprendre combien faible est l'assertion du prof. Störmer qui dit que l'aurore est causée par des particules chargées positivement.

J'ai donné dans A. P., p. 605-610, la théorie à laquelle je suis arrivé après plusieurs années d'expériences, sur la formation des voiles de lumière du Nord. J'y ai principalement attiré l'attention sur le fait suivant caractéristique que cette lumière aurorale, dans les régions polaires, apparaît souvent comme un rideau suspendu presque verticalement et formé de *rayons* parallèles. Ces rideaux ont le plus souvent leur direction longitudinale dans la zone aurorale.

Comme autre fait caractéristique, nous mentionnerons que le rideau auroral est souvent formé de l'est à l'ouest ou vice-versa, de telle manière que les rayons auroraux semblent précipités du ciel les uns après les autres, et cela si rapidement que le rideau peut être entièrement formé et s'étendre en travers du ciel en quelques secondes. Cette formation magnifique d'un rideau auroral où les rayons tombent avec des intervalles réguliers n'est peut-être pas le phénomène le plus fréquent ; nous voyons souvent tous les *rayons* descendre simultanément d'un arc auroral.

Comme toujours, pour nos explications des phénomènes magnétiques et auroraux de la terre, je me suis reporté à mes expériences sur la terrella. Ces expériences m'ont conduit à la conclusion que l'anneau lumineux continual de la zone aurorale de la terrella était dû à une succession très rapide de précipitations secondaires, empiétant l'une sur l'autre de telle sorte

que l'anneau lumineux semble être continu. Je me rappelle, par exemple, avoir compté, sur le côté couchant de la terrella, environ vingt précipitations distinctes dont les plus fortes étaient à l'est des plus faibles.

Le nombre de ces précipitations augmentait beaucoup plus rapidement que l'aimantation de la terrella. C'est cette opinion de la constitution de l'anneau lumineux qui doit être fermement maintenue en cherchant à développer la théorie de la formation des rideaux auroraux:

Les rayons cosmiques approchent de la terre de la même manière que nos rayons cathodiques approchent de la terrella. Nous devons supposer en conséquence que les rayons auroraux dans un rideau sont formés par un groupe relativement petit de rayons cathodiques qui pénètrent profondément dans notre atmosphère après s'être détachés successivement d'un faisceau plus large de rayons. Les différents groupes ont respectivement passé par l'équateur magnétique un nombre  $n$ ,  $(n + 1)$ ,  $(n + 2) \dots$  de fois.

Il est relativement facile, d'après les expériences avec la terrella, de calculer à quelques pour cent près, la différence des temps qui, de cette manière, doit correspondre aux entrées dans l'atmosphère des rayons auroraux  $n$  et  $(n + p)$  au moment où le rideau se forme.

Des expériences de ce genre doivent être faites avec un soin spécial pour obtenir la grande précision nécessaire. D'expériences antérieures faites sans penser spécialement au point de vue qui nous occupe, j'ai pu conclure que la différence de temps en question est d'environ un cinquième de seconde d'un rayon à l'autre.

La période qui représente le temps que forment les rayons pour passer de la zone aurorale sud à celle du nord dépendra par conséquent de la puissance magnétique actuelle des rayons cosmiques. En partant du point de vue mathématique seul et considérant la terre comme un aimant élémentaire, il serait possible de calculer avec une approximation suffisante cette période de temps.

Actuellement, il n'existe pas d'observations suffisamment exactes de cette période pour les rayons auroraux, mais il m'a

été possible, dans une récente publication<sup>(1)</sup>, de donner une méthode très exacte pour calculer cette période. J'ai pu également prédire, par analogie avec mes expériences sur la terrella, que les rayons corpusculaires qui donnent lieu à des orages polaires magnétiques sont formés, comme les rideaux auroraux, de groupes de rayons cosmiques, relativement petits et coordonnés distinctement, qui se détachent successivement d'un faisceau de rayons plus grand.

Au commencement d'un orage polaire, des groupes semblables de rayons sont précipités les uns après les autres vers la surface de la terre à des intervalles de temps d'environ un cinquième de seconde.

Au commencement d'orages magnétiques semblables, nous avons donc à attendre de fortes vagues élémentaires dont la période est d'environ un cinquième de seconde.

Des expériences faites à l'observatoire de Haldde prouveront dans peu de temps si cette hypothèse se réalise. J'en vois une confirmation dans le fait que les rayons auroraux peuvent tomber presque simultanément d'un arc déjà existant, comme cela a été mentionné plus haut. L'arc n'est souvent qu'une manifestation de la précipitation colossale de rayons qui donne lieu aux orages magnétiques.

Lorsque cette précipitation est déjà formée de petits groupes de rayons, on peut concevoir que, dans certaines conditions, quelques rayons de chaque groupe peuvent tomber en se succédant rapidement et même simultanément très bas dans l'atmosphère et y former un rideau auroral.

#### *Essais d'explication du prof. Störmer*

§ 8. Durant les deux dernières années, on a fait différents essais, ayant comme base les rayons corpusculaires, pour obtenir une explication plausible de la formation des rideaux auroraux.

<sup>1)</sup> On a possible experimentum crucis for the theories of northlight-curtains and polar magnetic storms. Videnskapsselskapets Skrifter Kristiania, 1915.

Villard (<sup>1</sup>) a eu une idée fort ingénieuse : il essaya, après quelques magnifiques expériences, de concevoir le rideau auroral comme formé de rayons cathodiques émanant de nuages dits « cirrus » ; sa théorie est assez analogue à celle d'Adam Paulsen sur ce sujet. Mais Villard fit un pas remarquable plus avant : il supposa que les rayons émanant des nuages sont attirés dans la direction d'un pôle magnétique terrestre, soit le pôle nord ; les rayons retournent après avoir pénétré dans l'atmosphère et formé un rayon auroral. Il suppose alors que les rayons retournent et vont vers le pôle sud où les mêmes rayons pénètrent dans l'atmosphère et forment un rayon auroral austral. Les rayons retournent de nouveau vers le pôle magnétique nord et y forment un nouveau rayon auroral à côté du premier, et ainsi de suite un très grand nombre de fois. Mais, à cause du grand pouvoir absorbant de l'atmosphère, il ne semble pas que cette théorie assez risquée puisse être maintenue, mais Villars a certainement fait un pas en avant du côté de la vérité.

Le prof. Störmer a fait un essai intéressant d'une théorie (<sup>2</sup>) mathématique sur la création des rideaux auroraux, basée sur la supposition que les rayons qui en réalité existent dans le rideau auroral, se tiennent toujours près des rayons qu'il calcule comme devant passer par le centre d'un aimant élémentaire représentant la terre. Mais la théorie de Störmer ne peut être considérée que comme une magnifique expérience mathématique, parce que les résultats qui en découlent ne sont pas conformes aux phénomènes observés ; je ne pense pas, par conséquent, que nous puissions dire que sa théorie puisse s'appliquer en quoi que ce soit à la nature, du moins en ce qui concerne les rideaux auroraux.

M. Störmer calcule, par exemple, qu'un rideau auroral long de 275 km. et d'une épaisseur de 72 m. peut être formé de rayons cathodiques ordinaires, en supposant que les rayons cathodiques suivent de près les rayons qui passent par le centre de l'aimant élémentaire. Mais cette hypothèse ne saurait être

<sup>1)</sup> Villard, *Les rayons cathodiques et l'aurore boréale*. Paris, 1907.

<sup>2)</sup> Störmer, *Arch. des Sc. phys. et nat.* Genève, 1907.

plus fausse : tous ceux qui ont vu une belle aurore boréale en formation le savent.

Lorsqu'il voit les rayons auroraux qui tombent du ciel et forment un rideau en s'ordonnant les uns après les autres à un intervalle d'environ un cinquième de seconde, M. Störmer pense après une courte méditation : « Si ces rayons venaient du soleil, ils auraient suivi un tout autre chemin ! »

Le prof. Störmer cite néanmoins sa théorie très souvent. Il dit lui-même dans son mémoire « Terrestrial magnetism » que la théorie mathématique des aurores qu'il a développée peut s'appliquer au cas de corpuscules négatifs aussi bien qu'au cas de corpuscules positifs. Cette assertion pourrait impressionner ceux qui n'y comprennent rien.

Toute théorie avec des rayons corpusculaires comme point de départ a, *ipso facto*, la propriété de s'appliquer de la même manière. Mais les faits observés sur la terre parlent clairement en faveur de rayons négatifs. Il résulte de mes expériences sur la nature physique des rideaux auroraux qu'une solution mathématique du problème concernant ce phénomène ne serait réalisable qu'au cas où un mathématicien pourrait trouver la solution de l'équation du mouvement des particules électrisées du soleil, lorsque les rayons arrivent sous l'influence du magnétisme de la terre.

Et même dans ce cas, je ne pense pas qu'il soit possible de développer cette théorie spéciale seulement par des considérations mathématiques. En tous cas il faudrait un mathématicien qui soit en rapport avec la nature d'une façon singulièrement intime, pour pouvoir révéler ses secrets par le seul moyen de l'analyse mathématique.

La méthode expérimentale offre un moyen beaucoup plus naturel pour explorer la nature de prime abord, même si ce moyen est difficile et pénible.

La méthode des analogies expérimentales aura toujours plus de valeur pour le philosophe. Lorsque des découvertes sont faites, l'analyse mathématique a un champ d'action superbe pour formuler d'une façon précise les découvertes et la théorie, pour en tirer des conséquences, et pour approfondir les détails.

Pour en revenir à notre problème, nous disons que la solution

générale de l'équation en question n'existe actuellement en aucune façon. Comme on le sait, le Prof. Störmer a développé une fort belle méthode pour calculer les divers parcours possibles que les corpuscules électriques provenant d'une cathode éloignée décrivent autour d'un aimant élémentaire. Mais, tant qu'on aura pas établi la distribution de tous ces parcours dans l'espace, et tant que l'analyse n'explique pas comment les rayons corpusculaires se groupent réellement en masse autour d'un aimant élémentaire, l'utilité de cette théorie est bien minime. En effet, elle ne réussit même pas à expliquer le phénomène très simple, mais très important, d'orages magnétiques polaires positifs et négatifs.

Considérons maintenant les raisons sur lesquelles Störmer se base pour se croire autorisé à nous dire que les rayons d'un rideau auroral sont produits par des rayons corpusculaires positifs. Il a étudié un seul graphique magnétique provenant de l'observation de Haldde, et correspondant à l'heure à laquelle il photographiait un rideau auroral. Le graphique montre un orage magnétique polaire au moment de l'observation de Störmer et cet orage polaire positif est superposé à un orage négatif beaucoup plus fort. Störmer ne mentionne pas ces deux orages; il presuppose seulement que les déflections magnétiques correspondant à l'orage positif sont produites par les rayons auroraux observés.

Mais il néglige simplement la déflection correspondant à l'orage négatif beaucoup plus fort qui existe en même temps.

Il est facile de démontrer qu'il est dangereux de tirer des conclusions d'un seul graphique. J'ai examiné 2400 courbes, et j'ai l'avantage de l'expérience. Il n'est pas possible de faire toutes les observations en quelques semaines comme les photographies d'aurores.

Si nous étudions des graphiques provenant d'un point quelconque de la partie inférieure de la zone aurorale, nous trouvons qu'il existe là de grands orages polaires positifs à des moments où l'on n'observe aucun rideau auroral; et il se produit de grands orages magnétiques, même lorsqu'il n'apparaît aucune aurore. Mais presque chaque fois que deux orages sont superposés l'un à l'autre et lorsque deux orages se succèdent directement, de

telle sorte que la déflexion magnétique change souvent de sens, *on trouve que des aurores existent simultanément*. Dans le cas particulier, il est évident que le Prof. Störmer n'a pas pris en considération le trait dominant du phénomène qu'il étudie, puisqu'il ne s'est pas occupé de l'existence d'orages positifs et négatifs.

Dans mon ouvrage A. P. presque toutes les recherches ont été effectuées dans le but de trouver la cause d'orages magnétiques semblables.

Je trouve que durant les orages polaires négatifs avec un maximum du côté du couchant de la terre, les rayons héliocathodiques sont précipités vers la zone aurorale, d'où en général ils s'infléchissent du côté de l'est avant de retourner de nouveau dans l'espace.

Pendant les orages polaires positifs avec un maximum du côté du midi de la terre, je dois supposer que les rayons qui arrivent s'infléchissent en général du côté de l'ouest juste au-dessus de la zone aurorale, avant de quitter la terre. Lorsque les deux orages sont superposés l'un à l'autre ou qu'ils se succèdent directement, quelques rayons, peu nombreux par rapport au faisceau total forment un rideau auroral : leur direction par rapport aux lignes magnétiques de force est telle qu'ils pénètrent *directement* vers la terre, et vont si profondément dans l'atmosphère qu'ils sont totalement absorbés avant de pouvoir retourner dans l'espace.

Ce sont quelques rayons de ce genre que le Prof. Störmer a fait intervenir par erreur comme cause des orages magnétiques positifs, dans la nuit du 11 au 12 mars 1913. Je ne veux pas pousser plus loin les critiques de son raisonnement, mais outre l'objection principale formulée plus haut, il y aurait lieu de faire d'autres remarques sérieuses, et je ne pense pas qu'aucun physicien puisse accepter sa manière d'interpréter les faits, quelque élégante que soit sa démonstration mathématique.

Helouan (Egypte), octobre 1915.