



HAL
open science

Sur les trajectoires des corpuscules électrisés dans l'espace sous l'action du magnétisme terrestre, avec application aux aurores boréales

C. Störmer

► **To cite this version:**

C. Störmer. Sur les trajectoires des corpuscules électrisés dans l'espace sous l'action du magnétisme terrestre, avec application aux aurores boréales. Radium (Paris), 1912, 9 (11), pp.395-399. 10.1051/ra-dium:01912009011039501 . jpa-00242574

HAL Id: jpa-00242574

<https://hal.science/jpa-00242574>

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.

**Sur les trajectoires des corpuscules électrisés
dans l'espace sous l'action du magnétisme terrestre,
avec application aux aurores boréales¹**

Par C. STÖRMER

[Université de Christiania. — Laboratoire de Physique.]

L'idée de faire intervenir les rayonnements corpusculaires dans la Physique cosmique paraît appartenir à Goldstein, qui dans son Mémoire de 1881² s'exprimait déjà de la façon suivante : « L'hypothèse que le vide est conducteur de l'électricité paraît avoir des conséquences très étendues, particulièrement dans le domaine cosmique. Il est admissible que le soleil envoie dans l'espace non seulement des rayons lumineux, mais aussi des rayons électrisés ». Pourtant c'est Birkeland³ qui, dix-huit ans plus tard, a donné une forme précise à cette idée en admettant que les rayons cathodiques émanés du soleil sont déviés par le champ magnétique terrestre selon la loi générale des actions électromagnétiques. Les aurores boréales

seraient la manifestation la plus nette de ces courants corpusculaires dans la haute atmosphère. Leurs différentes particularités de forme et de structure peuvent se prévoir d'après les lois de l'Électromagnétisme. C'est ce que M. Störmer a démontré et développé, au point de vue mathématique, dans son premier mémoire de 1907.

A la base de ce mémoire se trouvaient d'une part les belles expériences de Birkeland sur « la succion des rayons cathodiques vers un pôle magnétique », d'autre part quelques hypothèses, très simples et qu'il convient de rappeler ici. On néglige les mouvements propres du soleil et de la terre et on ne considère que leurs positions relatives. On néglige les actions électromagnétiques possibles ou bien entre les corpuscules eux-mêmes ou bien sur l'état magnétique de la terre. Enfin on néglige les forces de gravitation auprès des forces créées par le magnétisme terrestre, celui-ci étant assimilé en première approximation au

1. Ce travail est un extrait de publications plus détaillées : *Archives des Sciences physiques et naturelles*, août 1912 et *Traité des Aurores boréales*.

2. *Ueber die Entladung der Elektrizität in verdünnten Gasen*, Wied. Ann., 42-226.

3. *Krist. Vidensk. Selsk. Skrif.*, 4 1899, 168.

champ d'un aimant élémentaire, de moment $8,52 \times 10^{25}$ C. G. S. placé au centre de la Terre avec son axe le long de l'axe magnétique de celle-ci, le pôle sud tourné vers les régions arctiques.

Moyennant ces hypothèses, l'analyse mathématique donnait l'explication des faits suivants.

1° Le fait que les aurores polaires apparaissent surtout dans les zones arctique et antarctique; plus particulièrement, que les aurores apparaissent, en général, à l'intérieur des deux zones dites zones de fréquence maximum.

2° Le fait que les aurores peuvent apparaître pendant la nuit, qu'elles présentent si souvent des changements brusques, que ces phénomènes peuvent se répéter quelques jours de suite, presque à la même heure.

5° Le fait que les rayons auroraux suivent les lignes de force magnétique; que l'aurore a une tendance marquée à s'étendre en arcs, bandes ou draperies beaucoup plus longues que larges, orientées perpendiculairement au méridien magnétique, que ces draperies peuvent apparaître, plusieurs à la fois, l'une derrière l'autre.

La principale difficulté que laissait subsister cette théorie était la suivante. En supposant que la déviabilité magnétique des corpuscules soit de l'ordre des rayons cathodiques et des rayons β du radium, on était conduit à une zone d'aurore *trop étroite*, ayant un rayon de 6° au plus, tandis que la zone véritable avait un rayon de 20 à 25° . Même en supposant la déviabilité de l'ordre des corpuscules α du radium, on n'obtiendrait qu'un rayon de 16 à 18° .

Le présent mémoire a pour objet principal de montrer comment on peut lever cette difficulté. L'explication peut être recherchée dans deux ordres d'idées bien différents et actuellement il paraît plausible de les faire intervenir tous deux à la fois. D'abord il peut y avoir des corpuscules beaucoup moins déviables que les corpuscules des rayons cathodiques et des rayons β . Les zones théoriques d'aurore s'éloignent de l'axe magnétique à mesure que $H_0 \rho_0$ croît. Cela explique peut-être comment les aurores qui accompagnent les grandes taches solaires peuvent être observées en des endroits beaucoup plus éloignés de l'axe magnétique que les aurores ordinaires; en effet il est probable que les corpuscules émis par le soleil lors de pareilles et violentes éruptions sont beaucoup plus difficiles à dévier par les forces magnétiques que les corpuscules émis dans des conditions ordinaires. Le second point à envisager est le suivant. Il est très douteux que le champ magnétique terrestre soit bien représenté, même en première approximation, par l'aimant élémentaire de Gauss. Différents phénomènes et surtout les orages magnétiques si fortement étudiés par M. Birkeland et ses collaborateurs, montrent qu'il existe en dehors de la Terre des tourbillons corpuscu-

lares de grande intensité, capables de produire des effets magnétiques au moins égaux à ceux de notre globe. Ces tourbillons cathodiques dont la distribution nous est actuellement presque inconnue, créeront un champ de force supplémentaire. Le calcul montre que dans certains cas simples, probablement voisins de la réalité, l'effet de ces tourbillons de corpuscules est précisément *d'élargir* la zone de fréquence maximum des aurores polaires.

Avant de recourir à cette hypothèse supplémentaire, M. Störmer s'est assuré que l'insuccès de sa première théorie ne tenait pas à la trop grande simplification faite en admettant la théorie de l'aimant terrestre. Il a remplacé cette théorie simple par la théorie plus complète de Gauss, d'après laquelle les phénomènes du magnétisme terrestre sont dus à une distribution quelconque de masses magnétiques à l'intérieur du globe. Développant le potentiel de ces masses magnétiques en séries de fonctions de Laplace, et utilisant les calculs détaillés de M. Carlheim-Gyllensköld, on arrive à une détermination empirique des constantes et à une représentation suffisamment exacte du champ magnétique terrestre entre les époques 1600-1900. Partant de ces données, M. Störmer a construit graphiquement différentes lignes de force du champ magnétique terrestre. Ces lignes de force donnent déjà une première idée des trajectoires des électrons, lesquelles ont toujours, comme on sait, tendance à se rapprocher des lignes de force. M. Störmer a ensuite calculé deux trajectoires d'électrons elles-mêmes, et il a pu apprécier ainsi l'écart entre ces trajectoires et celles que fournit l'hypothèse simple de l'aimant élémentaire. L'écart existe, mais il est en somme petit, et sa valeur n'est jamais telle qu'elle puisse donner espoir d'arriver par là à étendre comme l'exige l'expérience la zone de fréquence maximum des aurores polaires. Même en introduisant dans le calcul les termes jusqu'au 6^e ordre d'après la théorie de Gauss, il est infiniment douteux qu'on obtienne des résultats satisfaisants si l'on garde pour le produit $H_0 \rho_0$ une valeur du même ordre que pour les rayons β du radium.

C'est alors que M. Störmer a été conduit, pour expliquer la situation de la zone d'aurore, à considérer l'action d'un champ magnétique *extérieur*, dû à des courants de corpuscules dans l'espace cosmique autour de la terre.

L'existence d'un tel champ extérieur a déjà depuis longtemps été reconnue par l'étude des orages magnétiques, et tout récemment les recherches importantes de M. Birkeland ont rendu très vraisemblable l'hypothèse d'après laquelle les orages magnétiques sont dus à des courants immenses de corpuscules dont l'action magnétique équivaut à des courants galvaniques de millions d'ampères. Mais, une fois l'existence de tels courants de corpuscules admise, le

champ magnétique très loin de la terre sera complètement différent de celui d'un aimant élémentaire, ainsi que de celui correspondant à l'hypothèse de Gauss.

Il paraît impossible d'aborder actuellement par le calcul le cas d'un champ créé par des corpuscules distribués d'une façon quelconque dans l'espace. M. Störmer concentre son attention sur un cas simple, très probablement assez voisin de celui qui est réalisé dans la nature. C'est le cas où le champ extérieur serait créé par des corpuscules localisés dans le plan équatorial à la façon d'un anneau. Les trajectoires constituant cet anneau seraient situées au voisinage d'une trajectoire circulaire concentrique à l'équateur magnétique du globe

et de rayon égal à $\sqrt{\frac{M}{H_0 c_0}}$ cm; ici M est le moment magnétique du globe et $H_0 c_0$ est le produit caractéristique pour les corpuscules dont le courant est supposé formé.

Ce cas simple est accessible au calcul, et il en est ainsi du cas plus général où les courants corpusculaires formeraient un ensemble de révolution autour de l'axe magnétique terrestre. Des calculs que nous ne reproduisons pas permettent alors à M. Störmer d'exprimer le potentiel en un point quelconque à l'aide de développements convergents, faciles à calculer au moyen des tables de Legendre. Une première propriété analytique de la solution est de faire connaître des régions de l'espace renfermant les trajectoires et d'où celles-ci ne peuvent sortir. Dans le cas spécial d'un aimant élémentaire et d'un anneau avec centre et axe commun, on peut construire sans difficulté ces régions par un procédé d'addition graphique. M. Störmer fait une discussion détaillée de la figure des courbes obtenues, il en détermine les points doubles, et précise diverses particularités pouvant intervenir dans l'application aux aurores boréales. En particulier il fixe entre quelles limites devront se tenir les constantes arbitraires figurant dans la solution. C'est ainsi que la valeur M du moment magnétique terrestre est assez exactement connue et égale à $8,52 \cdot 10^{23}$. Le rayon A de l'anneau équatorial

se tirera de la formule $A = \sqrt{\frac{M}{H_0 c_0}}$. Les valeurs du produit $H_0 c_0$ correspondant respectivement aux rayons α , aux rayons β du radium et aux rayons hypothétiques que M. Birkeland a introduits pour expliquer les perturbations magnétiques sont $100,4 \cdot 10^6$, et $7 \cdot 10^6$. Ceci conduit à placer A entre 50 mille et 10 millions de kilomètres. Quant à l'intensité en ampères du courant galvanique équivalent à notre anneau équatorial, elle est, toujours d'après M. Birkeland, de l'ordre de 10^7 à 10^8 . Enfin la valeur qu'il convient d'assigner au produit $H_0 c_0$ correspondant aux corpuscules équatoriaux semble comprise entre 10^3 et 10^6 .

En tenant compte de ces valeurs numériques et en discutant les différents cas qui peuvent se produire M. Störmer est arrivé à fixer d'une façon approximative, dans tous les cas qui semblent physiquement intéressants, la forme et la dimension des régions fermées d'où les rayons cathodiques émanés du soleil ne pourront pas sortir.

Nous arrivons maintenant au résultat mathématique essentiel de ce travail. Si l'on compare, soit dans l'hypothèse de l'aimant élémentaire, soit dans l'hypothèse plus perfectionnée de Gauss, l'étendue des zones d'aurore telle que la fournit la théorie de l'anneau équatorial avec l'étendue des mêmes zones sous l'action du champ terrestre seul, on arrive à cette conclusion importante : l'effet de l'anneau équatorial est de déplacer vers le sud et en même temps d'élargir notablement la zone de fréquence maxima des aurores polaires. On trouve une position et une extension de cette zone sensiblement conformes aux observations en admettant l'existence d'un seul courant de corpuscules dans le plan équatorial et sans qu'il soit nécessaire d'attribuer à ces corpuscules une déviabilité moindre que celle des rayons β du radium.

Il est intéressant de remarquer que le champ magnétique dû au courant équatorial n'est au voisinage du sol que le millième environ du champ terrestre. Ceci suggère l'idée de rattacher au champ extérieur équatorial les variations diurnes du magnétisme terrestre. C'est une notion à laquelle différents météorologistes étaient arrivés par une autre voie. On s'expliquerait ainsi de la sorte pourquoi il y a si souvent concomitance entre les fortes perturbations (orages magnétiques) et l'apparition des aurores dans des régions de latitude relativement basse.

Ajoutons toutefois que les calculs précédents laissent subsister une indétermination réelle. Ils ne permettent pas de fixer, indépendamment l'un de l'autre, les deux produits $H_0 c_0$ et $H_1 c_1$ qui servent de mesure au pouvoir pénétrant des corpuscules de l'anneau équatorial d'une part et des corpuscules de l'aurore polaire d'autre part. D'ailleurs cette circonstance même semble contribuer à l'explication d'un fait bien connu : c'est que, dans la zone de fréquence maximum, il y a probablement des aurores qui diffèrent extrêmement quant à leur nature physique. Les unes sont limitées aux régions les plus hautes de l'atmosphère, sont faibles et formées probablement de corpuscules peu pénétrants, d'autres au contraire descendent très bas dans l'atmosphère, sont extrêmement violentes et intenses et doivent probablement être formées de corpuscules très pénétrants, comme le suppose aussi M. Birkeland. Il est donc naturel de supposer que les valeurs du produit $H_0 c_0$, varient extrêmement pour ces diverses sortes d'aurore, et, tout de même, elles apparaissent toutes dans la

zone de fréquence maxima, correspondant à $\theta = 25^\circ$ environ.

Ce fait est inexplicable dans l'ancienne théorie d'un aimant élémentaire, même en admettant des particules de charge positive. Mais, avec l'hypothèse d'un anneau extérieur, la difficulté disparaît; cet anneau tend en effet à faire coïncider les valeurs θ de différentes sortes de corpuscules auroraux à mesure que l'intensité du courant augmente, c'est-à-dire que les frontières extérieures des zones d'aurore correspondantes se rapprochent d'une frontière commune et indépendante de $H_0\zeta_0$ et ne dépendant que du courant et cela même dans un espace de variation de $H_0\zeta_0$ plus grand que 1 : 1000.

Il nous reste à indiquer le contenu de la troisième partie du mémoire de M. Störmer : la comparaison entre la théorie précédente et les résultats relatifs à l'aurore boréale obtenus par une nouvelle méthode photogrammétrique. Nous nous aiderons ici du rapport détaillé sur l'expédition polaire ayant pour titre : « Bericht über eine Expedition nach Bossekop zwecks photographische Aufnahmen und Höhemessungen von Nordlichtern¹. » Cette publication minutieuse et précise est ornée d'un grand nombre de clichés d'aurore boréale dont la plupart sont d'un très grand intérêt.

La station de Bossekop (dans la Norvège septentrionale) fut choisie comme localité classique pour les observations d'aurore boréale. Elle est placée tout près de la zone de fréquence maximum des aurores et en même temps on a là tous les avantages de la civilisation; deux hôtels, un bureau de poste, une station télégraphique et communication par bateau deux fois par semaine. L'expédition put profiter de 17 soirées de temps clair et ne fit pas moins de 800 plaques dont plusieurs centaines se trouvèrent réussies. Les observations et les photographies furent faites en février et mars 1912.

Le problème consistant à prendre de l'aurore boréale des vues photographiques réussies présente de grandes difficultés, tant à cause de la faible luminosité de l'aurore, qu'à cause de sa mobilité, qui limite la pose à quelques secondes au maximum. On a fini par choisir un petit objectif cinématographique « Ernemann Kinostigmat » avec diaphragme de 25 mm et une distance focale de 50 mm seulement. Parmi les plaques, les essais prouvèrent que les plaques Lumière à étiquette violette possédaient une supériorité incontestable quoiqu'elles fussent insensibles à la raie principale jaune verte de l'aurore. Plus tard on constata que les plaques ultra-rapid de Hauff, Feuerbach, étaient plus sensibles encore. Deux stations photographiques furent établies, l'une à l'église d'Alten, l'autre à l'école d'Alten supérieure. Ces deux stations, distantes de 4280 mètres, étaient reliées té-

1. *Vidensk. Skrift.* 1911.

léphoniquement, de façon que sur le signal d'un des observateurs on pouvait prendre deux poses photographiques rigoureusement simultanées. Les clichés développés ont été agrandis par projection directe, l'agrandissement étant choisi de manière que 1 cm au milieu de l'image correspondît à l'angulaire sur le ciel. Les agrandissements étaient obtenus par dessin sur papier blanc des contours de l'aurore avec repérage des étoiles principales. La mesure des parallaxes se faisait par comparaison des deux agrandissements en utilisant les repères stellaires. Le calcul de l'aurore, en hauteur et en position, devient alors un pur problème de trigonométrie sphérique. M. Störmer développe les formules classiques sur lesquelles ce calcul se fonde et montre qu'on arrive assez rapidement au but par l'emploi de la machine à calculer.

Connaissant les particularités d'une aurore boréale en hauteur et en position, il est possible de se faire une idée sur le mécanisme qui leur donne naissance. Les interprétations deviennent à la fois plus faciles et plus instructives si l'on tient compte des résultats obtenus par Lenard et par Wegener sur la constitution de la haute atmosphère et sur l'absorption qu'y subissent les rayons cathodiques. D'après Wegener, et conformément aux idées de la théorie cinétique des gaz, les parties supérieures de l'atmosphère doivent être occupées de préférence par les gaz les plus légers. En supposant la température égale à -25° pendant les 10 premiers kilomètres, et égale à -55° à partir de cette hauteur, M. Wegener est arrivé à établir avec une certaine vraisemblance la constitution de l'atmosphère en fonction de la hauteur. Après la sphère d'azote et d'oxygène où nous vivons doit venir une sphère d'hydrogène, puis une sphère d'un gaz encore plus léger, qu'il propose d'appeler *géocoronium*. Lenard d'autre part a calculé une formule analogue à la loi du nivellement barométrique et qui relie l'absorption des rayons β à l'épaisseur du gaz traversée. En regardant les courbes d'absorption de Lenard, on voit que les rayons cathodiques seront arrêtés dans l'atmosphère d'hydrogène au-dessus de 100 km, tandis que les rayons β pénètrent dans l'atmosphère d'azote et sont arrêtés à des altitudes de 50 à 70 km, valeur généralement trouvée pour le bord inférieur des draperies d'aurore.

Cela posé, M. Störmer discute de très près quelques-uns des intéressants clichés qu'il a analysés par la méthode photogrammétrique. Pour le cliché d'une draperie d'aurore observée à Bossekop le 10 mars 1910, il montre que les hypothèses les plus plausibles conduisent à admettre une luminosité produite par des rayons cathodiques de faible vitesse. D'autres arcs d'aurore conduisent au contraire à reconnaître comme possible l'existence de rayons β émanés du soleil et dont la vitesse serait bien supérieure à celle des rayons

1. Voir *Le Radium*, 9 (1912).

du radium. Ce résultat est d'accord avec celui de Lenard, qui admet aussi des rayons auroraux d'un pouvoir pénétrant extrêmement grand. On voit quelles intéressantes questions a pu aborder M. Störmer. Signalons en terminant le fait suivant. L'étude minutieuse des rayons auroraux à une hau-

teur supérieure à 100 km. permet d'espérer obtenir quelques renseignements sur la température de la très haute atmosphère. Pour l'explication de ce point nous renvoyons au mémoire original.

[Manuscrit reçu le 12 novembre 1912].
