LES RAYONS CATHODIQUES ET L'AURORE BORÉALE ;Par M. P. VILLARD ⁽¹⁾.

Un certain nombre d'auteurs admettent que l'aurore boréale est produite par des rayons cathodiques, mais aucune théorie satisfaisante n'a été proposée pour expliquer la structure et les mouvements de l'aurore. Quant à la cause proprement dite du phénomène, il semble difficile de choisir entre les hypothèses faites à ce sujet avant de savoir en quoi consiste le phénomène lui-même et d'être en mesure d'en expliquer les diverses particularités.

Cette explication ne résulte pas immédiatement des propriétés des rayons cathodiques : on ne voit pas *a priori* comment ces rayons donneraient à l'aurore l'aspect d'un éventail ou d'une draperie reposant sur un arc dont l'intérieur est sombre, pourquoi les rayons auroraux seraient dirigés suivant les méridiens magnétiques alors que les rayons cathodiques s'enroulent autour des lignes de force d'un aimant ; on ne comprend pas davantage les mouvements de rotation de l'aurore boréale autour de l'axe magnétique de la Terre.

⁽¹⁾ L'expérience reproduisant l'aurore boréale a été répétée devant la Société de Physique à la séance du 4 Mai 1906.

L'hypothèse d'une émission cathodique n'apparaît donc pas avec un caractère d'évidence immédiate. Pour en vérifier le bien fondé, il est manifestement nécessaire d'entreprendre une étude détaillée des propriétés magnétiques des rayons cathodiques, et, si l'hypothèse en question est exacte, les résultats de cette étude expliqueront immédiatement tous les phénomènes auroraux.

Les rayons cathodiques ne sont pas les seuls à considérer au point de vue qui nous occupe. La preuve n'a pas été faite qu'ils soient la cause de l'aurore boréale et l'examen comparatif des divers rayonnements de nature électrique peut seul permettre de décider quelle hypothèse il convient d'adopter.

Indépendamment des rayons cathodiques, trajectoires des corpuscules négatifs, le passage de l'électricité dans un gaz raréfié produit des rayons qui transportent des charges positives et sont, par suite, sensibles à un champ magnétique. Le sens de la déviation est inverse de celui des corpuscules cathodiques, mais cette déviation a lieu suivant les mêmes lois.

Les particules positives qui forment ces rayons possèdent une charge égale en valeur absolue à celle des corpuscules négatifs, mais leur masse matérielle est beaucoup plus grande : chacune représente un atome d'hydrogène auquel on a enlevé un corpuscule, soit $1/2000$ seulement de son poids ; son électrisation positive résulte simplement de ce fait qu'un atome neutre a perdu une certaine charge négative $-e$, et possède par suite la charge complémentaire $+e$.

Enfin des poussières électrisées se comporteraient dans une certaine mesure comme des corpuscules cathodiques. M. Arrhénius a précisément supposé que, sous l'action répulsive de la lumière, des poussières suffisamment ténues ($1/1000$ de millimètre de diamètre environ) pourraient être repoussées par le Soleil malgré leur poids et, formées dans le voisinage de l'astre central, s'éloigneraient de lui et arriveraient jusqu'à la Terre. En admettant que ces poussières soient électrisées, M. Arrhénius explique, par leur arrivée dans notre atmosphère, la production de l'aurore boréale et la dépendance manifeste qui existe entre l'apparition des aurores et les manifestations de l'activité solaire.

Si nous comparons les charges transportées par un même poids de ces corpuscules ou particules, nous aurons une idée très nette des effets magnétiques auxquels on doit s'attendre.

Un gramme de corpuscules cathodiques transporte 186 500 000 coulombs.

Un gramme de particules positives, qui sont 1933 fois plus lourdes, transporte seulement 96 500 coulombs ; c'est la charge d'un gramme d'hydrogène dans l'électrolyse.

Enfin les poussières chargées à 10 000 volts, par exemple, ne possèdent qu'une charge infiniment moindre, soit, pour 1 gramme, environ $1/10\,000$ de coulomb, ou moins encore si elles possèdent une densité élevée.

Les corpuscules donneront donc des effets magnétiques considérables et seront fortement déviés par le champ terrestre.

Les particules positives subiront des déviations deux mille fois moindres, mais encore très sensibles. Dans le voisinage de l'aimant terrestre, les rayons cathodiques s'enrouleront en circonférence de 60 mètres de diamètre au plus ; les rayons positifs, dans les mêmes conditions de vitesse, décriront des spires de 120 000 mètres. Quant aux poussières électrisées, non seulement elles seront à peine sensibles au champ terrestre, mais elles seront très rapidement arrêtées par la résistance de l'air. Elles pourront être la cause originelle de l'aurore, mais elles n'en expliqueront pas la structure et les déplacements.

Nous allons examiner maintenant l'action d'un champ magnétique sur les rayons cathodiques. Au sens et à la grandeur près, les résultats seront applicables aux rayons positifs.

Champ uniforme. — On sait que, lancé dans un champ uniforme, un corpuscule cathodique décrit, suivant que sa vitesse est normale ou oblique au champ, une circonférence ou une hélice. Cette propriété est d'ailleurs évidente :

Supposons en effet le corpuscule lancé perpendiculairement aux lignes de force. Il est soumis à une force constamment perpendiculaire à sa vitesse ; celle-ci reste donc invariable. La direction seule est modifiée, tout en restant évidemment dans un plan perpendiculaire au champ (plan contenant la vitesse et la force). La trajectoire est donc plane. D'autre part, la force est constante, l'accélération l'est donc également ainsi que la courbure ; la trajectoire suivie par le projectile cathodique devant être à la fois plane et à courbure constante ne peut être qu'une circonférence, parcourue d'un mouvement uniforme.

Si le rayon incident est oblique au champ, sa vitesse peut être

Supposons maintenant qu'un rayon cathodique soit émis par un

Après un quart de tour, le mobile est arrivé au point A, et sa vitesse, toujours égale à V, est dirigée maintenant suivant Oy. Or, quand le mobile était en O, sa vitesse n'avait pas de composante dans le sens Oy. Donc, pendant le trajet OA, l'action du champ a communiqué à ce mobile une vitesse V, parallèle à Oy.

Soit M la position du mobile à l'instant t, ds l'élément parcouru dans le temps dt, ω l'angle MCO ; l'accélération MN dirigée suivant MC (normalement à la trajectoire) a pour composante suivant Oy ;

$$M'N' = MN \cos \omega ;$$

$$\text{or } MN = \frac{HeV}{m} \text{ d'où}$$

$$M'N' = \frac{HeV}{m} \cos \omega ;$$

pendant le temps dt, cette accélération imprime au mobile une vitesse dont la composante suivant Oy a pour valeur :

$$dV = \frac{HeV}{m} \cos \omega \cdot dt.$$

D'autre part, $ds = Vdt$, d'où

$$dV = \frac{He}{m} \cos \omega \cdot ds ;$$

mais $\cos \omega ds$ n'est autre chose que dx et, par suite,

$$dV = \frac{He}{m} dx.$$

Or la somme de tous les éléments dV donne, au bout d'un quart de tour, précisément V. La somme des éléments dx, pour l'arc OA, n'est autre que CA, rayon de la circonférence, et l'intégration se réduit à écrire :

$$V = \frac{He}{m} R,$$

ou bien

$$R = \frac{mV}{eH}.$$

FIG. 2.

On aurait également pu remplacer ds par sa valeur $Rd\omega$ et écrire :

$$dV = \frac{HeR}{m} \cos \omega d\omega ;$$

intégrant de zéro à $\frac{\pi}{2}$, on retrouve la formule précédente.

point d'une cathode. Ce point d'émission n'est géométriquement qu'un point de la trajectoire; il se trouve donc, si le rayon est perpendiculaire au champ, sur la circonférence. Autrement dit, tous les rayons émis par un point dans un plan perpendiculaire au champ, quelles que soient leurs vitesses, décriront des circonférences contenant le point d'émission et, par suite, reviendront tous à ce point. Si les vitesses seules diffèrent, mais non les directions, on obtiendra une famille de circonférences toutes tangentes à la direction initiale au point d'émission, et de diamètres différents (*fig. 3*).

Pour un observateur regardant dans le sens du champ, l'enroulement est décrit dans le sens des aiguilles d'une montre.

En considérant la formule précédente, on voit qu'il revient au même de faire varier le champ ou la vitesse; avec des rayons de vitesse unique, on obtiendrait, en faisant varier le champ, l'aspect

Si la vitesse OV (*fig. 2*) fait un angle α avec la direction Oz du champ, on doit la résoudre en deux composantes $OA = V \sin \alpha$ et $OB = V \cos \alpha$.

La première composante ferait décrire au mobile une circonférence C ayant pour rayon :

$$R' = \frac{mV \sin \alpha}{e \cdot H};$$

le mouvement étant uniforme, l'arc $OS = s$ sera proportionnel au temps et aura pour valeur :

$$s = V \sin \alpha \times t.$$

La composante $V \cos \alpha$, parallèle au champ, produira simplement une translation uniforme parallèle à Oz . Le trajet parcouru sera proportionnel au temps et, par suite, à l'arc s .

L'ordonnée SP' de la trajectoire étant ainsi proportionnelle à l'abscisse curviligne s est une hélice. Le pas p de cette hélice est la valeur de z qui correspond à un tour complet, c'est-à-dire à $s = 2\pi R'$.

Le rapport des trajets étant celui des vitesses, on a :

$$\frac{p}{2\pi R'} = \frac{V \cos \alpha}{V \sin \alpha} = \frac{1}{\tan \alpha} \quad \text{ou} \quad \frac{p}{R'} = \frac{2\pi}{\tan \alpha}.$$

Remplaçant R' par sa valeur, il vient :

$$p = 2\pi \frac{mV}{eH} \cos \alpha.$$

L'avant-dernière égalité montre de plus que, si α est invariable, il en est de même du rapport $\frac{p}{R'}$.

Le rapport du pas de l'hélice à son diamètre ne dépend donc ni du champ, ni de la vitesse, mais seulement de la direction. Autrement dit, des corpuscules cathodiques de direction constante, lancés avec des vitesses quelconques dans des champs d'intensités diverses, décriront des hélices semblables.

de la *fig. 3*. Le diamètre de chaque circonférence serait en raison inverse du champ.

Si les rayons sont obliques au champ, et de même direction, on aura une famille d'hélices dont le pas et le diamètre sont l'un et l'autre proportionnels à la vitesse et dont le rapport est celui des deux composantes de cette vitesse, c'est-à-dire constant. Ces hélices seront donc semblables et enroulées sur des cylindres parallèles au champ; de même que les circonférences précédentes passaient

FIG. 3. — Enroulement de rayons de vitesses différentes et de même direction initiale OV (trois rayons seulement figurés).

toutes par le point d'émission, les cylindres dont il s'agit auront tous une génératrice commune passant par ce même point (*fig. 4*).

FIG. 4. — Enroulement hélicoïdal de deux rayons de même direction et de vitesses différentes dans un champ uniforme (hélices semblables).

Enfin, si les directions et les vitesses sont quelconques, on aura des hélices quelconques, mais les cylindres d'enroulement conserveront la génératrice commune dont il s'agit.

Pour réaliser les conditions voisines de ces cas théoriques, on prend une cathode plane ou faiblement concave, de 8 millimètres à 10 millimètres de diamètre, enfermée dans une coupe en verre sur

les bords de laquelle s'applique une lame de mica percée d'une ouverture de 3 millimètres à 4 millimètres de diamètre (*fig. 5*). L'émission se fait uniquement par le point de la cathode situé en face du centre de cette ouverture, qu'elle soit près du milieu ou des bords de la cathode; celle-ci étant assez large, le champ électrique est sensiblement uniforme dans son voisinage, seule région de l'ampoule où il soit intense, et l'on a un faisceau presque parallèle et très étroit, suffisant pour observer dans de bonnes conditions les circonférences d'enroulement et quelques spires d'hélice. Avec une cathode enfermée dans une coupe très aplatie, on peut très facilement observer le retour des rayons au point d'émission (*fig. 5 c*).

On obtient également de bons résultats avec des cathodes analogues à celles de M. Hittorf (*fig. 5, a*).

Tous ces dispositifs s'améliorent à l'usage; le métal se creuse au point de départ du faisceau et celui-ci devient de mieux en mieux défini.

FIG. 5. — Cathodes employées pour obtenir un faisceau cathodique fin.

Quelques précautions sont à prendre pour l'usage de ces appareils fragiles. Les décharges irrégulières de la bobine de Ruhmkorff conviennent mal; il faut employer soit la machine statique, soit un transformateur à haut voltage qui fournit un courant d'une parfaite régularité. On met un rhéostat sur le primaire et une résistance liquide sur le circuit secondaire.

Le vide doit être fait sur l'oxygène pur, dans lequel les rayons cathodiques sont extrêmement visibles. Cet oxygène s'épuisant assez vite, on le renouvelle en chauffant un petit tube fixé à l'ampoule et

contenant un peu d'oxyde d'argent pur, préparé sans faire usage de filtres et lavé seulement par décantation.

La *fig. 6* représente un enroulement photographié dans une ampoule de ce genre. Sur la *fig. 7* on a photographié le faisceau initial et son enroulement dans une série de champs de diverses valeurs, jusqu'à 1200 unités environ. On reconnaît l'aspect prévu par la *fig. 3*.

FIG. 6. — Faisceau cathodique fin photographié : 1° sans faire agir le champ magnétique ; 2° quand le champ est établi.

FIG. 7. — Même expérience en ... au champ diverses valeurs.

Pour étudier les hélices, il faut diaphragmer le faisceau de manière à éliminer tous les rayons sensiblement écartés de la direction principale. On y arrive aisément en plaçant, en avant de la cathode, un diaphragme de mica percé d'une très petite ouverture. Celle-ci pourra être sur la ligne de force passant par le point d'émission (ligne OH de la *fig. 4*). En réglant convenablement l'inclinaison de la cathode (perpendiculaire à OV) et la distance du diaphragme, on épure le faisceau après une ou deux ou trois spires complètes ; on reste d'ailleurs maître de faire varier à volonté le diamètre des cylindres d'enroulement, puisqu'on diaphragme sur la génératrice commune à tous.

Il est souvent préférable de diaphragmer au contraire sur une ligne telle que M'N', parce que les rayons de vitesses différentes sont alors plus séparés. Mais le diamètre des hélices est alors imposé,

et c'est en réglant la valeur du champ qu'on arrive à faire passer les rayons par le trou ménagé dans la lame de mica.

FIG. 8. — Enroulement d'un rayon cathodique dans un champ oblique à sa direction.

Ce mode d'épuration du faisceau, après un nombre convenable de spires ou de demi-spires, donne beaucoup de précision aux observations et permet de distinguer jusqu'à dix spires complètes.

La *fig. 8* représente un enroulement ainsi obtenu. On voit que les choses se passent tout à fait conformément à la théorie.

Champ non uniforme. — Les rayons s'enroulent encore suivant les courbes qui rappellent l'hélice, mais *cet enroulement ne se fait pas en général sur un tube de force.*

Le problème ne peut être abordé géométriquement que dans des cas très simples : supposons, par exemple, un champ tel qu'on l'obtient entre les pôles de deux électro-aimants droits placés dans le prolongement l'un de l'autre. Ce champ est de révolution, il possède un plan équatorial ; dans ce plan, et dans des plans parallèles, il décroît de l'axe à la périphérie ; les lignes de force sont courbes et convergent vers les pôles (champ en forme de barillet).

Considérons un rayon lancé dans le plan équatorial suivant une direction AV passant par l'axe O du champ (*fig. 9*), et donnons-nous la position des lignes d'égale force magnétique (circulaires) et la valeur de la force sur chacune de ces lignes (décroissante de l'axe à la périphérie), cette décroissance étant représentée par un écartement progressif des lignes d'égale force.

Si le champ était uniforme, comme il est perpendiculaire au plan de la figure, le rayon s'enroulerait suivant une certaine circonférence de centre P, indiquée en pointillé. Mais, à mesure qu'il s'éloigne de la ligne α , la force diminue, le rayon de courbure de la trajectoire augmente et celle-ci s'écarte de la circonférence P. Arrivé

sur une certaine ligne β , en B, le projectile cathodique est dirigé tangentielllement à β et, continuant à tourner, il rencontre dans le sens croissant les champs qu'il avait, de A à B, traversés dans le sens décroissant. Le problème est analogue à celui du mirage, et l'arc décrit, BC, sera symétrique de AB par rapport à OB. Au point C, le rayon sera dirigé suivant CO, et la courbure en ce point sera la même qu'en A. Il est essentiel de remarquer que le point C doit être non sur la circonférence P, mais en dehors, comme le montre la figure. Si, en effet, on avait deux arcs AB, BC symétriques, tels que A et C soient sur la circonférence P, la courbure passerait en B par un maximum, tandis qu'elle y passe par un minimum. Le point C est donc en dehors de la circonférence, ce qui l'éloigne de A.

FIG. 9. — Construction de la spirale cathodique à double enroulement dans le plan équatorial d'un champ non uniforme produit entre deux pôles magnétiques.

A partir de C, le rayon rencontre des champs plus intenses que le long de la ligne α , et croissants : la courbure de la trajectoire augmente jusqu'à un certain point B' où elle est maxima, puis décroît à mesure que le rayon revient vers la ligne α qu'il atteint en A' ; les deux arcs CB', B'A' sont symétriques et, au point A', le rayon se retrouve dans les conditions initiales. Mais il est décalé de la quantité AA'. Comme il n'y a aucun obstacle en ce point, il recommence

une deuxième spire identique à la précédente, puis une troisième, et

FIG. 10. — Réalisation de l'enroulement de la *fig. 9*. La cathode est analogue à *b* de la *fig. 5*; la lame de mica, suffisamment prolongée, présente une petite ouverture correspondant au point *A'* de la *fig. 9* et servant à diaphragmer le rayon après une spire. Le pas de la spirale (distance *AA'*) est ainsi imposé. On la réalise aisément en faisant varier la position de l'ampoule ou la valeur du courant magnétisant de l'électro-aimant. *O*, axe du champ.

FIG. 11. — Photographie de l'enroulement cathodique de la *fig. 9*.

ainsi de suite indéfiniment; c'est ce qui est représenté sur la même figure à droite.

Ainsi, tandis que, dans un champ uniforme, le projectile cathodique décrirait une circonférence et, en l'absence d'obstacles, recommencerait indéfiniment la même circonférence, il décrit ici une spirale particulière telle qu'après chaque tour complet le rayon est décalé d'une quantité constante; autrement dit, la spirale ne se referme pas sur elle-même; elle constitue un double enroulement : 1° autour du champ magnétique; 2° autour de l'axe de ce champ (*fig. 10 et 11*).

Cette courbe peut être définie géométriquement d'une manière très simple : sa courbure est, en chaque point, proportionnelle au champ. Si on connaît la loi suivant laquelle le champ H varie en fonction de la distance ρ à l'axe,

$$H = f(\rho),$$

on doit avoir :

$$R = \frac{mV}{e \times f(\rho)}.$$

Au lieu de considérer un rayon partant d'un point tel que A dans une direction OV , on aurait pu le prendre dirigé d'une manière quelconque. Le point d'émission n'étant pas autre chose qu'un point de la trajectoire, cela reviendrait à commencer la spirale précédente par un quelconque de ces points.

Considérons maintenant le cas beaucoup plus intéressant d'un rayon lancé obliquement dans un champ semblable au précédent.

Supposons, pour simplifier, la cathode dans le plan équatorial et le rayon lancé obliquement à ce plan, du côté d'un des pôles par conséquent. Si le champ était uniforme, après un tour complet le rayon rencontrerait de nouveau la ligne de force passant par le point d'émission. Mais, comme dans le cas précédent, le champ est plus intense près de l'axe que loin de cet axe. L'arc d'hélice extérieur s'allongera donc comme le faisait la courbe ABC de la *fig. 9* par rapport à la circonférence, puis deviendra plus serré comme l'arc $CB'A'$ et, de même que le rayon ne repassait pas par A , il ne reviendra pas à la ligne de force initiale, il y aura un décalage : à chaque spire, ce décalage se reproduira, et le rayon s'écartera de la ligne de force en question.

En même temps ce rayon, avançant vers un pôle, rencontrera des champs de plus en plus intenses. Assimilons ce champ, sur une petite étendue, au champ divergent à lignes de forces rectilignes produit par un pôle isolé. M. Poincaré a démontré que, dans ce cas,

le rayon s'enroule suivant une ligne géodésique située sur un cône ; or une semblable ligne, après s'être rapprochée du sommet du cône, rebrousse chemin et s'en éloigne indéfiniment. Autrement dit, le pas de l'hélice diminue plus vite que son diamètre, devient nul sans que celui-ci le soit, puis devient négatif ; le corpuscule s'éloigne alors du pôle, et le diamètre des spires recommence à croître.

Dans le cas où les lignes de force convergentes sont courbes au lieu d'être rectilignes, nous pouvons sinon démontrer, du moins admettre qu'il y aura à la fois rebroussement et décalage de la trajectoire hélicoïdale de pas variable. Le premier phénomène prévu par la théorie de M. Poincaré résulte de la convergence des lignes de force, le second est dû, comme on l'a vu plus haut, à la plus grande intensité du champ près de son axe.

On entrevoit tout le parti qu'on pourra tirer de ce rebroussement des hélices cathodiques pour expliquer que l'aurore boréale n'aille pas jusqu'au pôle magnétique, qui reste entouré d'une zone sombre.

FIG. 12. — Enroulement cathodique dans le champ obtenu entre deux pôles d'électro-aimant. La trajectoire rebrousse chemin à une certaine distance du pôle dont s'approche le rayon. Le retour se fait obliquement par rapport à l'aller. Au-dessus de l'enroulement se voient deux faisceaux de rayons magnéto-cathodiques qui suivent les lignes de force, rectilignes en apparence par effet de perspective.

Le rayon s'enroulera ainsi en spires décroissantes sur une surface fusiforme oblique par rapport à la ligne de force passant par la cathode. Cet enroulement s'arrêtera à une certaine distance du pôle, s'en éloignera ensuite, puis s'arrêtera de nouveau à la même distance de l'autre pôle, reviendra vers le premier, et ainsi de suite, sans que le rayon puisse rencontrer les parois de l'ampoule si celle-ci contient les pôles ou au

moins en est très près. Quant au décalage, il ne dépend que de la condensation du champ vers l'axe et, par suite, a lieu tout le temps dans le même sens, produisant comme pour la *fig. 9* un enroulement général centré sur l'axe de l'électro-aimant, et parcouru dans le sens des aiguilles d'une montre pour un observateur regardant suivant la direction du champ.

On se représentera assez bien cette trajectoire en imaginant un long ressort en hélice qu'on reploierait en zigzag, et qu'on poserait sur un baril de manière à en faire le tour. La *fig. 12* montre un exemple de ce phénomène, on voit l'aller et le retour du rayon ainsi que le décalage (une lame de mica arrête le rayon après le premier aller et retour).

FIG. 13. — Calque de la photographie stéréoscopique d'un enroulement cathodique entre les pôles d'un électro-aimant.

La *fig. 13* est le calque exact d'une photographie stéréoscopique de l'enroulement obtenu avec un faisceau très fin ⁽¹⁾.

Dans une ampoule un peu vaste, on observe aisément un nombre d'allers et de retours suffisant pour couvrir une surface faisant le tour complet de l'axe du champ ; la spirale cathodique, composée de rayons dont les vitesses et les directions diffèrent légèrement, s'étale bientôt, on ne voit plus que les tubes d'enroulement et l'aspect général est celui d'un baril lumineux dont les douves, séparées à leurs extrémités, se croiseraient en leurs milieux (Voir *fig. 16, 17 et 18*).

(1) La reproduction de l'épreuve en photogravure eût été mauvaise à cause de la faiblesse des spires d'ordre élevé, nécessairement un peu étalées et par suite moins brillantes que les premières. En outre, l'inévitable réseau a le défaut de supprimer l'effet stéréoscopique, à cause de l'aspect ponctué de l'image et du défaut de correspondance des points qui la composent. Le dessin au trait peut au contraire être reproduit sans trame ; celui-ci n'est d'ailleurs que le renforcement, à la plume, du positif véritable.

THÉORIE DE L'AURORE BORÉALE.

Les particularités principales de l'aurore sont les suivantes.

L'aurore affecte généralement la forme d'un éventail composé de bandes lumineuses semblables à des faisceaux de projecteurs convergeant vers le pôle magnétique, mais s'arrêtant à distance de celui-ci, et s'appuyant en quelque sorte par leur extrémité sur un arc dont l'intérieur est sombre (*arc auroral*).

La base de chaque faisceau sur cet arc présente un renforcement notable. La longueur des rayons est variable ; souvent on les voit aller d'un pôle à l'autre.

Par instants, des mouvements se produisent dans l'aurore ; les rayons se déplacent le long de l'arc auroral comme si l'ensemble tournait tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, autour de l'axe magnétique du globe.

Parfois la base des rayons s'élève ou s'abaisse comme si chaque faisceau lumineux était animé d'un mouvement longitudinal (*danse des rayons*).

Il faut ajouter à cela les taches lumineuses dans le ciel (*plaques aurorales*).

Les phénomènes d'enroulement des rayons cathodiques dans un champ non uniforme permettent d'expliquer la plupart de ces aspects et même de discuter l'origine de l'énergie électrique du météore.

Si l'aurore est produite par des particules cathodiques émanant du Soleil, ces particules ne peuvent arriver à la Terre que si le champ magnétique solaire est négligeable. En effet, ce champ étant de révolution, les rayons cathodiques y produiraient l'enroulement composé en zigzag formant autour du Soleil une nappe de révolution dont les points d'émission feront partie, et les corpuscules devraient, à l'aller et au retour, passer à une distance de l'axe égale à celle du point d'émission, c'est-à-dire très près de la surface solaire. On peut se représenter la chose en imaginant que, dans la *fig. 9*, la circonférence qui est l'enveloppe intérieure de la spirale est l'équateur solaire.

Le diamètre des spires d'enroulement sera lui-même négligeable devant le diamètre du Soleil (dans un champ de $1/10$ d'unité, pour des particules ayant la vitesse de la lumière, ce diamètre serait de 300 mètres environ).

Ainsi le champ magnétique solaire est incompatible avec l'arrivée des particules cathodiques sur la Terre; l'hypothèse de l'origine solaire des rayons cathodiques nous oblige donc à admettre que ce champ est sensiblement nul, ce qui est possible, vu la température élevée de l'astre.

Supposons donc les particules cathodiques entrant dans le champ magnétique terrestre qui s'étend jusqu'au Soleil et au delà : leurs trajectoires s'enrouleront, donneront la nappe en zigzag ayant pour axe l'axe magnétique du globe et passant par le lieu d'émission, soit le Soleil. Le rayon de l'enveloppe extérieure de la nappe sera par suite égal à celui de l'orbite terrestre.

On pourra donc voir peut-être, très près des pôles, les extrémités de tous les faisceaux d'enroulement ; mais comme, à chaque aller et retour, ils devront s'éloigner à une distance égale à celle du Soleil, s'ils ne sont pas absorbés en route, ils seront hors de l'atmosphère, dans un vide parfait, et invisibles. Comme il est certain que les aurores boréales ou australes peuvent donner des rayons qui, même à l'équateur, sont encore dans l'atmosphère terrestre, les rayons cathodiques qui les produisent ne peuvent venir directement du Soleil, à moins de perturbations magnétiques cosmiques telles que les rayons soient captés par la Terre au moment où ils arrivent près de celle-ci.

Mais il est possible que ces particules d'origine solaire arrivent assez près des pôles terrestres pour rencontrer des cirrus, qui accompagnent toujours l'aurore.

Des cirrus peuvent être électrisés négativement, parce que les ions négatifs condensent la vapeur d'eau plus facilement que les ions positifs. Or j'ai observé récemment que des rayons cathodiques à grande vitesse frappant un objet quelconque électrisé négativement provoquent une abondante émission de rayons par le point frappé, même si, au voisinage de ce point, la chute de potentiel est par elle-même beaucoup trop faible pour produire spontanément une émission (120 volts suffisent). La vitesse de ces rayons correspond à la chute de potentiel en question. Les cirrus, formés d'aiguilles de glace électrisées négativement, constitueraient ainsi de vastes cathodes secondaires. L'émission produite, normale à l'ellipsoïde terrestre, serait oblique au champ magnétique et l'on serait dans les conditions voulues pour avoir l'enroulement composé déjà décrit. L'arrivée de particules électrisées provenant du Soleil n'est d'ailleurs

pas nécessaire pour que les cirrus se déchargent. L'ultra-violet solaire, dont l'existence n'est pas douteuse, suffit à produire ce résultat : M. Buisson a en effet reconnu que la lumière ultra-violette décharge la glace électrisée négativement.

Rien n'empêche d'admettre l'existence d'autres causes excitatrices d'origine cosmique, radiations ou rayons. De même, on pourrait, au lieu de cirrus électrisés, imaginer des nuages de poussières cosmiques chargées d'électricité. Le vide interplanétaire étant isolant, ces poussières ne pourraient perdre leur charge qu'en rencontrant les couches supérieures de notre atmosphère. Cette décharge, que les radiations solaires faciliteraient, se produirait précisément à une hauteur où la raréfaction de l'air est semblable à celle qu'on réalise dans les ampoules de Crookes, et les rayons cathodiques produits dans ce milieu raréfié se propageraient sans obstacle à de grandes distances. Ces poussières, cause primitive de l'aurore, pourraient être celles que M. Arrhénius suppose nous être envoyées par le Soleil.

Ce sont d'ailleurs là de simples conjectures destinées à fixer les idées, mais étrangères à la théorie même de l'aurore. Cette théorie a en effet pour but d'expliquer les caractères de l'aurore au moyen des propriétés des rayons cathodiques, et ces propriétés sont indépendantes de la nature de la source électrique. La seule chose que puisse indiquer l'étude électromagnétique de l'aurore est la région de l'espace où il conviendrait de rechercher la source en question. Cette région doit être très voisine de la Terre, et sans doute située dans notre atmosphère. Le lieu d'émission des corpuscules est en effet sur leurs trajectoires et, par suite, dans la nappe que celles-ci forment dans le champ terrestre. Or, d'après toutes les observations, cette nappe entoure la Terre à une distance qui, même à l'équateur magnétique, ne dépasse pas quelques centaines de kilomètres. Il est donc nécessaire que les rayons cathodiques auroraux soient d'origine terrestre, cette origine restant d'ailleurs provisoirement inconnue.

Nous n'avons ainsi à considérer que l'explication des aspects présentés par l'aurore, celle-ci étant supposée produite par des rayons émis dans notre atmosphère, la présence d'un gaz étant nécessaire pour qu'ils soient visibles.

Ces rayons sont soumis au champ terrestre, qui, malgré sa faible intensité, suffit à donner des enroulements qui n'ont pas 100 mètres de diamètre pour des corpuscules ayant la vitesse de la lumière. Or

le champ terrestre présente une grande analogie de forme avec celui qu'on obtient entre deux pôles d'aimants : les lignes de force seront seulement rentrantes aux pôles, c'est-à-dire plus courbes, ce qui ne peut qu'exagérer les effets observés avec l'électro-aimant.

Considérons donc l'enroulement en zigzag de la *fig. 13* ; ce sera évidemment celui des rayons dans le champ terrestre dont la direction est généralement oblique au champ électrique de l'atmosphère. Mais, au lieu d'un point, nous aurons une large surface d'émission, un cirrus par exemple. Tous les rayons ainsi émis auront à peu près même vitesse et même direction ⁽¹⁾ et donneront des enroulements identiques dont l'ensemble formera un large faisceau dans lequel aucune spire ne sera évidemment visible. Ce faisceau, dont l'épaisseur sera le diamètre d'une spire, et la largeur celle du cirrus plus ce même diamètre, se comportera comme chacun des enroulements dont il est composé ; il se dirigera par exemple vers le Nord, un peu obliquement aux lignes de force, puis rebrousse chemin à une certaine distance du pôle pour repartir vers le Sud, la nouvelle direction étant symétrique de la première par rapport à la force magnétique. Vers le pôle Sud, nouveau rebroussement, retour vers le Nord, avec décalage toujours dans le même sens, et, de nouveau, arrêt à la même distance du pôle que précédemment, puis encore départ vers le Sud, et ainsi de suite.

Aux points de rebroussements, qui sont à la même distance d'un pôle si le champ est de révolution, tous les filets cathodiques se replient sur eux-mêmes et l'expérience de la *fig. 13* montre que, même si les directions sont un peu différentes, le repliement de la spirale ne change pas de position : comme, d'autre part, le pas des spirales tend vers zéro, il se produit une condensation de lumière, un renforcement très visible résultant du tassement des spires vers le lieu de rebroussement ⁽²⁾.

Représentons comme sur un planisphère (*fig. 14*) la nappe des rayons cathodiques. Le lieu des extrémités des faisceaux fusiformes (ayant comme convergence à peu près celle du champ) étant à une distance constante de chaque pôle (dépendant seulement de la con-

⁽¹⁾ Ils seront, en effet, produits par le champ électrique terrestre.

⁽²⁾ Dans l'expérience de la *fig. 13*, le faisceau cathodique est devenu presque invisible, par suite de son étalement, au bout de dix ou douze spires, et l'on voit cependant très bien les boucles terminales correspondant à la vingtième ou vingt-cinquième spire.

vergence du champ près de ce pôle) sera un parallèle magnétique représenté ici par une droite. Ce sera l'*arc auroreal* avec les renforcements signalés plus haut et observés dans l'aurore boréale.

FIG. 14. — Nappe cathodique en zigzag représentée en planisphère et montrant la production des rayons et des arcs auroreaux.

La superposition partielle de l'aller et du retour de chaque fuseau (oblique au champ) constituera un faisceau résultant dont la direction moyenne sera évidemment celle du champ. Cette superposition doublant l'intensité lumineuse, ce sera surtout près des arcs auroreaux que le météore sera visible. Nous avons ainsi les rayons auroreaux disposés en éventail sur l'arc auroreal, à l'intérieur duquel il n'y a rien, puisque les rayons cathodiques n'y peuvent pénétrer.

Si le pas du décalage, c'est-à-dire la distance des points homologues des spires de rebroussement de deux retours successifs, est supérieur à la largeur du faisceau d'ensemble, les rayons auroreaux seront distincts : ce sera l'aurore classique en éventail. Si ce pas est moindre, il y aura superposition partielle de deux rayons auroreaux voisins ; il en résultera des renforcements de lumière simulant les plis d'une draperie (*aurore en draperies*).

Quel que soit le lieu d'émission, le sens de l'enroulement composé est celui des aiguilles d'une montre pour un observateur regardant le Nord magnétique : c'est le sens de rotation de la Terre. Si donc on avance vers l'Est, on rencontrera des fuseaux cathodiques dont le numéro d'ordre sera de plus en plus élevé, et qui, par suite de la déperdition d'énergie sous forme de lumière, seront de plus en plus faibles, jusqu'à évanouissement complet après une fraction plus ou moins grande du tour de la Terre.

Supposons que l'émission ait lieu sous l'influence d'un rayonne-

ment solaire (l'ultra-violet par exemple) ; l'aurore commencera dans l'hémisphère éclairé, et s'avancera vers l'Est en s'affaiblissant ; en abordant l'hémisphère obscur, elle deviendra visible, et le côté de cet hémisphère pour lequel le Soleil vient de se coucher sera évidemment le lieu où l'on verra les fuseaux d'ordre peu élevé, c'est-à-dire les plus brillants. Ce sera donc aussitôt après le coucher du Soleil qu'on aura le plus de chances de voir une aurore boréale, car, à mesure que la Terre tournera, entraînant l'observateur vers l'Est, il faudra, pour arriver jusqu'à lui, des aurores de plus en plus intenses et, partant, plus exceptionnelles. Or cette conséquence de la théorie est entièrement conforme à l'observation, et elle permet de décider si l'aurore est due à des rayons cathodiques ou à des rayons chargés positivement. Ces derniers suivraient dans l'espace des trajectoires tout à fait semblables à celles qui ont été indiquées plus haut : les spires seraient simplement de plus grand diamètre. Mais le sens de description de la nappe formée par ces trajectoires serait inverse et progresserait de l'Est à l'Ouest ; ce serait donc avant le lever du Soleil, et non après son coucher, que les aurores seraient le plus souvent visibles. Or il n'en est rien, et nous en devons conclure que c'est bien aux rayons cathodiques qu'il convient de s'adresser pour expliquer les faits observés, ce qui n'était nullement démontré.

Supposons maintenant une perturbation magnétique ayant pour effet de changer localement la convergence du champ vers le pôle. Aussitôt le point de rebroussement du fuseau cathodique s'éloignera ou se rapprochera du pôle ; on aura le mouvement longitudinal de la *danse des rayons*.

Si, au contraire, on modifie soit la vitesse des rayons (différence de potentiel motrice), soit l'intensité du champ, les spires cathodiques se resserrent par exemple de 10 0/0 (champ plus intense ou vitesse moindre), mais, en même temps, les fuseaux se rapprochent ; celui qui part du lieu d'émission reste à peu près fixe ; son diamètre, égal à la largeur du cirrus plus celle d'une spire, change à peine ; le second se rapproche du premier de 10 0/0 ; le troisième se déplace deux fois plus, et ainsi de suite : on verra donc les bases des fuseaux courir le long de l'arc auroral par une véritable rotation autour de l'axe magnétique, rotation dont on se fera une idée exacte en imaginant que, sur la *fig. 14*, on resserre tous les fuseaux à la manière de ces appliques extensibles formées d'entretoises en losanges.

Ce phénomène est facile à reproduire dans un grand ballon placé entre les pôles d'un électro-aimant (*fig. 13*) et dans lequel on pro-

FIG. 13. — Expérience réalisant l'enroulement composé en zigzag (aurore artificielle).

duit des rayons cathodiques en un point dans une direction convenable. On a la nappe déjà décrite et, si l'on fait varier le champ, cette nappe, sans changer de forme ni de diamètre, s'enroule ou se déroule à volonté autour de son axe, chaque fuseau se déplaçant proportionnellement à son numéro d'ordre. Le phénomène est encore plus saisissant si la source électrique est un alternateur présentant un peu de *pompage*, d'où résultent des variations périodiques de voltage qui modifient la vitesse cathodique et produisent la rotation de l'aurore artificielle. Cette rotation n'est donc qu'un phénomène de *pompage* naturel du champ terrestre ou du potentiel atmosphérique. C'est à la seconde cause qu'il faut attribuer les mouvements auroraux qui ne sont pas accompagnés d'une variation de l'intensité magnétique.

La *danse des rayons* s'obtient aisément, dans l'expérience précédente, au moyen d'une tige de fer qu'on approche et éloigne alternativement d'un des arcs auroraux. La présence de cette tige produit une perturbation magnétique qui allonge en quelque sorte le pôle voisin et augmente localement la convergence des lignes de force ; il en résulte un déplacement du point de rebroussement du faisceau

FIG. 16. — Nappe cathodique en zigzag limitée par deux parallèles magnétiques. En haut à gauche, le départ du faisceau cathodique. Le ballon est fortement décentré par rapport à l'électro-aimant pour augmenter le décalage en zigzag, qui est d'autant plus marqué que le champ est moins uniforme. La nappe, de rayon plus grand que le ballon, est arrêtée par la paroi après un demi-tour, ce qui supprime le fond lumineux qu'elle formerait en remontant de l'autre côté de l'axe.

FIG. 17. — Même expérience avec un champ plus intense, donnant un grand nombre de zigzags dans un demi-tour de la nappe cathodique.

correspondant ou, si l'on veut, une déformation de l'arc aural, qui est une ligne équipotentielle magnétique. On reproduit d'une manière analogue le *ruissellement* de l'aurore, par le mouvement des spires enchevêtrées.

FIG. 18. — Nappe cathodique obtenue en plaçant le centre du ballon sur l'axe du champ magnétique. La nappe fait alors le tour complet du ballon.

Les *fig. 16* et *17* montrent cette nappe cathodique en zigzag et la transformation qu'elle subit quand on augmente l'intensité du champ (ou quand on diminue la vitesse des rayons). Dans la *fig. 18*, le ballon a été centré sur l'axe du champ, la nappe se referme alors sur elle-même, et aucun rayon cathodique ne peut atteindre les parois.

La *fig. 19* a été obtenue en photographiant la nappe cathodique d'un point situé au voisinage de son centre : l'objectif était ainsi placé à peu près comme l'œil d'un observateur regardant une aurore boréale. On reconnaît immédiatement l'aspect de l'aurore classique en éventail, et le renforcement des rayons sur l'arc aural est parfaitement visible, ainsi que l'affaiblissement progressif du phénomène d'un bord à l'autre de la figure (de l'Ouest à l'Est dans le phé-

nomène naturel). A l'intérieur de l'arc auroral se voient de faibles faisceaux magnéto-cathodiques⁽¹⁾, inévitables dans un champ intense.

FIG. 19. — Aurore artificielle. Vue de la nappe cathodique précédente prise d'un point situé à son intérieur et dans une direction inclinée à 45° environ sur l'axe. L'origine des rayons est à gauche en dehors de la figure.

Ainsi cette étude de l'électromagnétisme cathodique conduit non seulement à une explication vraisemblable d'un phénomène naturel remarquable, mais à la possibilité d'en discuter l'origine terrestre ou cosmique.

(1) Ces rayons particuliers, qui prennent naissance dans des champs très intenses et peuvent partir même d'une anode, pourvu qu'elle soit voisine de la cathode, suivent les lignes de force jusqu'aux pôles. D'autre part, ils peuvent être émis non seulement par une électrode ou objet voisin d'une cathode, mais par tous les points d'un faisceau cathodique placé dans un champ convenable. Après un trajet plus ou moins long, ce faisceau finit par se résoudre presque complètement en rayons magnéto-cathodiques.