



Les Rayons cathodiques dans le champ magnétique

P. Villard

► To cite this version:

P. Villard. Les Rayons cathodiques dans le champ magnétique. Radium (Paris), 1906, 3 (4), pp.97-106.
10.1051/radium:019060030409700 . jpa-00242175

HAL Id: jpa-00242175

<https://hal.science/jpa-00242175>

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.

Les Rayons cathodiques dans le champ magnétique

Par P. VILLARD,

Docteur ès sciences.

Professeur suppléant au Conservatoire National des Arts et Métiers.

A la suite d'observations diverses, d'anomalies singulières, signalées par divers auteurs à propos des aspects présentés par les ampoules cathodiques placées dans le champ magnétique, je me suis proposé de reprendre les expériences de Hittorff sur l'enroulement des rayons dans un champ, ainsi que celles, plus anciennes, de Plücker.

Un rayon cathodique est, comme on sait, la trajectoire d'une particule électrisée, dont la charge, toujours négative, est celle de 1 atome d'hydrogène électrolytique (7×10^{-10} unités électrostatiques ou $2,5 \times 10^{-19}$ coulombs), mais d'une masse environ deux mille fois moindre.

Ces corpuscules, comme on les appelle, ne peuvent guère être étudiés que dans des ampoules où l'on a réalisé un vide très avancé pour supprimer tout obstacle au mouvement, et avec des différences de potentiel de quelques milliers de volts au moins et souvent supérieures à 25 000 volts. Exceptionnellement, on peut descendre à 500 volts. Les vitesses observées dans ces conditions¹ sont énormes; elles se chiffrent par milliers de kilomètres à la seconde, et peuvent dépasser le tiers de la vitesse de la lumière.

La masse de ces corpuscules pourrait être matérielle au sens ordinaire du mot (hydrogène par exemple); certains auteurs pensent que les propriétés de l'électricité suffisent à expliquer l'inertie de ces corpuscules et les considèrent comme des atomes d'électricité libre (*électrons*).

L'apparence de masse serait un phénomène purement électro-magnétique. Si, en effet, on déplace une charge électrique, il en résulte un courant de convection qui produit autour de lui un champ magnétique. L'accélération qu'il a fallu appliquer à cette charge

pour lui donner une vitesse se traduisant ainsi par la production d'un champ magnétique qui emmagasine de l'énergie, un travail a dû être dépensé pour produire la vitesse en question: c'est bien là le caractère de l'inertie; si maintenant nous voulons arrêter cette charge en mouvement, détruire sa vitesse, cet arrêt restituera l'énergie emmagasinée, exactement comme l'arrêt d'un corps en mouvement ne peut se faire qu'en absorbant sa force vive, en la transformant par exemple en chaleur.

Supposons au contraire l'atome électrique lancé et se mouvant uniformément en ligne droite: le courant électrique qu'il représente est constant, le champ produit ne varie pas, aucune dépense de travail n'est donc nécessaire; c'est identiquement ce qui arrive pour un objet matériel en mouvement uniforme.

Ainsi l'atome de fluide électrique ou électron, par cela même qu'il est une charge, possède une inertie, il a une véritable masse, mais cette masse est d'une singulière nature, bien faite pour dérouter la notion d'invariabilité, de constance, que nous attachons à l'expression: masse d'un corps. Considérée en effet comme un phénomène électromagnétique, la masse *augmente avec la vitesse*; cet accroissement est sans doute faible aux vitesses courantes (projectiles, et même planètes ou comètes), mais il devient très sensible quand on arrive au tiers ou à la moitié de la vitesse de la lumière (vitesses cathodiques): pour la vitesse même de la lumière la masse serait infinie.

Cette notion nouvelle de la nature purement électrique des corpuscules conduit d'ailleurs à cette conséquence paradoxale qu'elle n'exclut nullement la présence de matière ordinaire dans ces mêmes corpuscules; il est en effet naturel, puisque l'électromagnétisme explique l'inertie, d'admettre que toute inertie, partant toute masse, est de nature électrique. La matière, telle que nous la concevons, serait un assemblage d'électrons, son inertie serait de la self-induction et la masse d'un objet varierait avec la vitesse jusqu'à devenir infinie pour 500 000 km : s. C'est dire qu'un projectile ne pourra jamais être lancé avec la vitesse de la lumière.

S'il en est ainsi, rien ne s'oppose à admettre que les corpuscules cathodiques contiennent par exemple de l'hydrogène, puisque cela n'empêche en rien leur masse d'être d'origine purement électromagnétique.

Quelle que soit d'ailleurs l'hypothèse admise, le rayon cathodique est la trajectoire d'une masse élec-

1. La vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la chute de potentiel motrice. En effet, soient m la masse, e la charge, u la chute de potentiel, v la vitesse.

On a évidemment

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU, \\ v = \sqrt{U \frac{2e}{m}} \quad (\text{unités C. G. S.}),$$

$\frac{e}{m}$ est voisin de $1,8 \times 10^7$. U est le nombre de volts multiplié par 10^8 . Pour 1000 volts, on aura

$$v = \sqrt{1000 \times 10^8 \times 5,6 \times 10^7} \\ = \sqrt{5,6 \times 10^9} \frac{cm}{sec} = 1,7 \times 10^4 \frac{km}{sec},$$

soit 17 000 km par seconde.

Pour 100 000 volts ce serait dix fois plus, soit 170 000 kms.

T. III.

trisée. Il est équivalent à un courant et, comme tel, sensible à un champ magnétique.

Champ uniforme. — Le calcul de la modification qu'un champ uniforme fera subir à la trajectoire est un problème de balistique très simple : supposons 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 et la ligne plane suivie par le projectile cathodique devant rester identique à elle-même sur tout son trajet, ne peut être qu'une circonférence parcourue d'un mouvement uniforme.

Si le rayon incident est oblique au champ, sa vitesse peut être résolue en deux composantes : l'une, perpendiculaire au champ, donne une circonférence parcourue à vitesse constante (arc proportionnel au temps); l'autre, parallèle au champ, produit un déplacement du mobile proportionnel aussi au temps et non modifié par le champ. Nous avons ainsi un point dont l'ordonnée est proportionnelle au temps comme son abscisse curviligne : ce point se déplace donc sur une hélice dont le diamètre est celui de la circonférence correspondant à la composante de la vitesse perpendiculaire au champ.

Le rayon de cette circonférence, ou du cylindre sur lequel s'enroule l'hélice, est évidemment en raison inverse du champ et proportionnel à la vitesse; il est donné par la formule très simple

$$R = \frac{m}{e} \frac{v}{\mathcal{H}} \quad (\text{unités électromagnétiques C. G. S.}),$$

$\frac{m}{e}$ étant le rapport de la masse à la charge, v la vitesse ou sa composante perpendiculaire au champ, $\mathcal{H}$ le champ; m et e n'interviennent évidemment que par leur rapport, car, si l'on rend solidaires par exemple deux projectiles identiques, ce qui double charge et masse, la trajectoire du système reste celle de chaque projectile.

Supposons maintenant qu'un rayon cathodique soit émis par un 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. 1).

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;

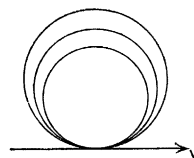


Fig. 1 et 1 bis. — Enroulement de rayons de vitesses différentes et de même direction initiale (trois rayons seulement figurés).

avec des rayons de vitesse unique on obtiendrait, en faisant varier le champ, l'aspect des figures 1 et 1 bis. 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 toutes par le point d'émission, les cylindres dont il s'agit auront tous une génératrice commune passant par ce même point (fig. 2).

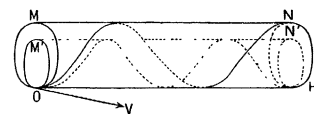


Fig. 2. — Enroulement hélicoïdal de deux rayons de même direction et de vitesses différentes dans un champ uniforme (hélices semblables).

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 des conditions voisines de ces cas théoriques, on prend une cathode plane ou faiblement concave, de 8 millimètres à 12 millimètres de dia-

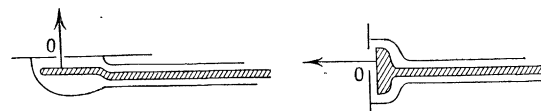


Fig. 3. — Cathodes employées pour obtenir un faisceau cathodique fin.

mètre, enfermée dans une coupe en verre sur les bords de laquelle s'applique une lame de mica percée d'une ouverture de 5 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 ou-

verture, 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.

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

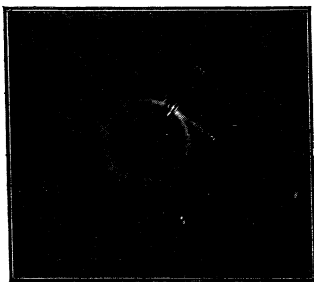


Fig. 4.

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 figure 4 représente un enroulement photographié dans une ampoule de ce genre. Sur la figure 5 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 figure 1.

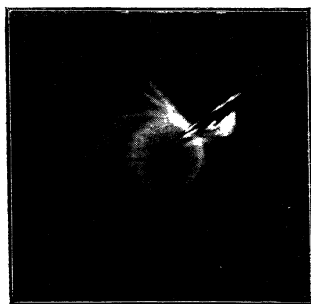


Fig. 5. — Photographie d'un faisceau cathodique et enroulement de ce faisceau dans des champs successifs de plus en plus intenses.

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 figure 2). En réglant convenablement l'in-

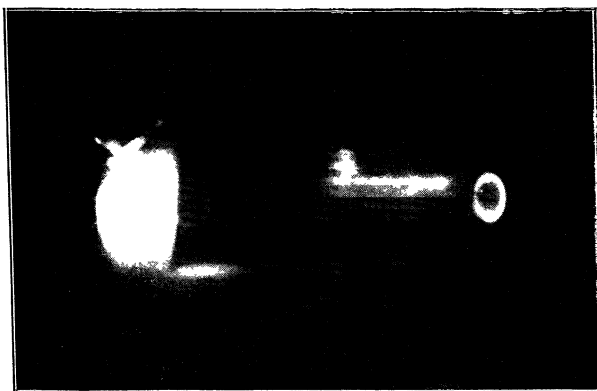


Fig. 6. — Hélice cathodique dans un champ uniforme. On voit que le faisceau est plus étroit que l'ouverture d'émission (cathode de la fig. 5). Toutes les spires passent par la ligne de force issue du point d'émission. (Ce faisceau est diaphragmé après une spire).

clinaison de la cathode (perpendiculairement 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 MN ou 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.

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

La figure 6 représente des enroulements ainsi obtenus. On voit que les choses se passent tout à fait conformément à la théorie.

Champ non uniforme. — Les rayons s'enroulent encore suivant des courbes qui rappellent l'hélice, mais *cet enroulement ne se fait pas 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 (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. 7) et donnons-nous la position des lignes d'égalité de la force magnétique (circulaires) et la valeur de la force sur chacune de ces lignes (décroissant 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

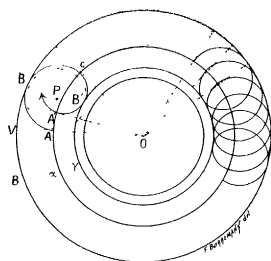


Fig. 7. — Construction de la spirale cathodique à double enroulement dans le plan équatorial d'un champ non uniforme produit entre deux pôles magnétiques.

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 ne peut être sur la circonférence P, et qu'il est en dehors, comme le montre la figure. Si, en effet, on avait deux arcs AB, BC, symétriques, tels que B et C soient sur la circonférence P, la courbure passerait en B par un maximum, tandis qu'elle y passe par un minimum. C' est donc en dehors de la circonférence.

A partir de C le rayon rencontre des champs plus intenses que le long de la ligne z 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 z, 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 ainsi de suite indéfiniment; c'est ce qui est représenté sur la même figure à droite.

Fig. 8. — Spirale cathodique à double enroulement conforme au tracé de la fig. 7.

Ainsi, tandis que dans un champ uniforme le projectile cathodique décrirait une circonférence et, en l'ab-

sence 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.

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 ses 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 figure 7 par rapport à la circonférence, puis deviendra plus serré comme l'arc CB' A' et, de même que le rayon ne repassait 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 plus en plus 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 force 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.

Nous pouvons donc sinon démontrer, du moins admettre, qu'il y aura à la fois le phénomène du rebroussement de la trajectoire hélicoïdale de pas variable, et en même temps le phénomène de décalage déjà décrit, le premier dû à la convergence du champ vers le pôle, le second à la plus grande intensité de ce champ près de son axe.

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 figure 7 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 dans la direction du champ.

On se représentera assez bien cette trajectoire en imaginant un long ressort en hélice qu'on replierait en zigzag, et qu'on poserait sur un baril de manière à en faire le tour. La figure 9 montre un exemple de ce phénomène, on voit l'aller et le retour du rayon

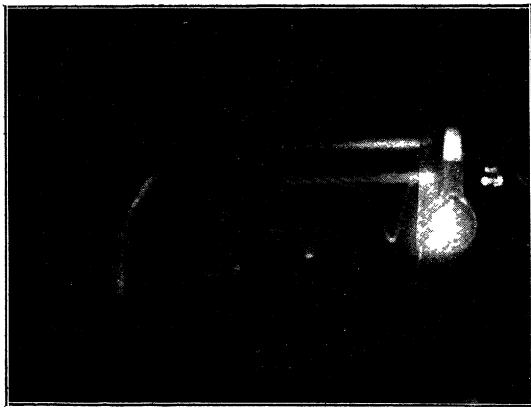


Fig. 9. — Rebroussement et décalage d'une spirale cathodique dans un champ non uniforme (grandeur naturelle). On voit en même temps deux faisceaux magnéto-cathodiques.

ainsi que le décalage (une lame de mica arrête le rayon après le premier aller et retour).

La figure 10 est le calque exact d'une photographie de l'enroulement ⁴,



Fig. 10.

Dans une ampoule un peu vaste, on observe aisément un nombre d'aller et de retours suffisant pour couvrir une surface faisant le tour complet de l'axe du champ; l'aspect est celui d'un baril lumineux dont

les douves, séparées à leurs extrémités, se croiseraient en leurs milieux.

Rayons magnétocathodiques. — Indépendamment de l'enroulement, simple ou composé, des rayons cathodiques, le champ magnétique fait apparaître un

4. 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. 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.

phénomène complètement différent, entrevu par Plücker puis signalé plus nettement par M. Birkeland et par M. Broca.

Plücker avait observé que dans un champ magnétique intense la lucur négative d'un tube de Geissler se dispose suivant un tube de force ayant pour base la cathode. M. Birkeland a décrit un phénomène analogue ; pour une certaine valeur de la force magnétique à la cathode, celle-ci émet, par toute sa surface, des rayons qui suivent les lignes de force et se terminent à une certaine distance de la cathode sans cause apparente.

En reprenant ces expériences j'ai constaté les faits suivants :

Dans une ampoule où le vide de Crookes est réalisé, si la cathode est plane ou concave, et à peu près adossée à la paroi de l'ampoule, il n'y a émission notable de rayons cathodiques que par le centre de la cathode, du côté libre. Vient-on à placer cette ampoule dans un champ magnétique, les rayons s'enroulent d'abord en spires d'autant plus serrées que le champ est plus intense, puis, presque brusquement, l'aspect se modifie complètement ; un large faisceau de rayons apparaît, figurant un tube de force qui a la cathode pour base, et les deux faces de la cathode émettent des faisceaux identiques. Les lois ordinaires de l'émission sont complètement transformées.

L'action d'un champ magnétique se manifeste encore d'une autre manière : supposons un tube à rayons X, à son vide normal, alimenté par un condensateur isolé.

La décharge passe, abaisse le potentiel du condensateur, et le tube cesse de fonctionner.

Mais, si on approche un aimant, aussitôt le potentiel explosif est assez abaissé pour que la décharge recommence, pour cesser bientôt, après un nouvel abaisse-



Fig. 11. — Lieu de l'extrémité d'un faisceau cathodique arrêté par un plan fluorescent et placé dans un champ croissant.

ment, assez considérable, du voltage du condensateur.

Ainsi le champ magnétique n'a pas seulement une action directrice sur la décharge électrique, il en modifie profondément le régime, abaissant le voltage

explosif¹ et changeant complètement le régime de l'émission.

Si maintenant nous prenons une cathode pourvue d'un diaphragme étroit, semblable à celle de la figure 5, les rayons étant dirigés obliquement dans un champ uniforme, que nous ferons croître, les rayons s'enrouleront d'abord et leur trace sur la paroi opposée décrira une courbe (fig. 11) dont les boucles décroissantes passeront toutes par un point fixe, trace de la ligne de force qui passe par le point d'émission. Ce sera un point asymptotique. Mais, après avoir parcouru une dizaine de boucles par exemple, la tache fluorescente cessera de présenter des mouvements de giration qui indiquent la continuation de l'enroulement : elle deviendra uniforme et fixe, et son diamètre

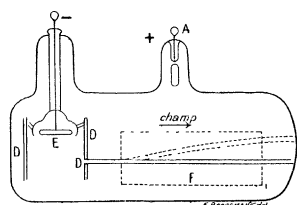


Fig. 12. — Ampoule pour rayons magnétocathodiques. — Déviation électrostatique de ces rayons.

sera exactement celui du diaphragme cathodique, l'émission se faisant alors par toute la partie de la cathode et non plus par un seul point. Ce dispositif peut évidemment, s'il y a deux espèces de rayons, donner un mélange ; le suivant paraît préférable (fig. 12) : une cathode disposée comme le montre la figure est placée entre deux plaques de mica D, D' dont l'une sert à

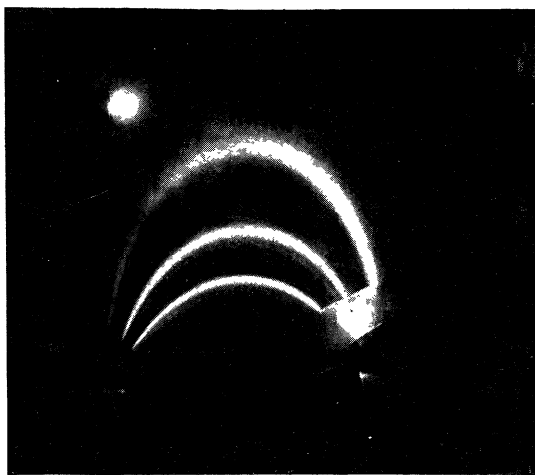


Fig. 15. — Rayons magnétocathodiques émis par des ouvertures pratiquées dans une lame de mica placée près d'une cathode, ainsi que par les bords de cette lame. L'ampoule est posée sur un électro-aimant en fer à cheval. Les rayons suivent les lignes de force.

protéger le verre de l'ampoule, l'autre étant percée d'une ou deux ouvertures telles que O.

1. On peut observer une élévation de ce voltage quand les rayons cathodiques sont ramenés par le champ vers la cathode, parce qu'ils électrisent alors les parois de l'ampoule ; c'est un effet secondaire.

Pour une valeur convenable de champ tous les rayons émis par E s'enroulent sur des cylindres de diamètre inférieur à la distance EO, aucun ne peut passer par cette ouverture. Mais celle-ci émet un faisceau intense de rayons dirigé suivant les lignes de force (fig. 15).

Si l'on fait passer ce faisceau entre deux plateaux parallèles tels que F, en toile métallique, très rapprochés, et entre lesquels on crée un champ électrostatique, les rayons sont déviés comme le montre la figure 12, parallèlement aux plateaux, c'est-à-dire que la déviation est perpendiculaire aux lignes de force électrique.

On peut recevoir ces rayons dans un cylindre de Faraday (protégé par une enceinte) ; on constate qu'ils ne le chargent pas, tandis que les rayons cathodiques ordinaires le chargent négativement.

Pour rappeler le mode de production de ces singuliers rayons, je les ai désignés par le nom de rayons *magnétocathodiques*.

M. Fortin a proposé pour ces rayons une théorie qui les ramènerait à n'être que des rayons cathodiques ordinaires de vitesse assez faible pour que l'enroulement ne soit pas visible.

M. Fortin a calculé la trajectoire d'un rayon cathodique dans un champ magnétique et un champ électrique simultanés. Si le rayon est enroulé en spires de très petit diamètre, l'ensemble de l'enroulement est dévié dans un plan presque perpendiculaire à la force électrique, le sens de la déviation variant avec le sens du champ magnétique et celui de la force électrique.

Or, si les spires sont petites, s'il y a un mélange de rayons de diverses vitesses et de directions un peu différentes (c'est toujours le cas), l'ensemble de l'enroulement formera un cylindre où l'on ne distinguera rien, et qui simulera un faisceau de rayons rectilignes.

Cette théorie s'applique à un grand nombre de cas, et il arrive souvent qu'un faisceau d'apparence rectiligne n'est en réalité qu'un faisceau cathodique reconnaissable aux mouvements de giration que présente, quand le champ varie, la tache fluorescente produite sur le verre. La charge d'un cylindre de Faraday est aussi un critérium sûr.

Nos connaissances sont trop incomplètes pour décider si cette théorie très simple et très séduisante ne convient pas à tous les cas. Les phénomènes d'ionisation permettraient peut-être d'expliquer l'absence de charge d'un cylindre de Faraday par les rayons magnétocathodiques. Il y a donc lieu, sans faire d'objections proprement dites à cette manière de voir, d'indiquer les anomalies que la découverte de phénomènes nouveaux pourrait seule faire disparaître.

En premier lieu, c'est le passage discontinu d'un phénomène à l'autre. Des rayons enroulés en cylindre étroit chargent bien un cylindre de Faraday, puis, brusquement, pour un médiocre accroissement de champ, l'aspect du faisceau change et l'électromètre

tombe à zéro ; le potentiel de décharge n'est pas sensiblement modifié, le degré de vide reste identique, il semble bien que c'est la nature des rayons qui n'est plus la même. En même temps toute trace d'enroulement¹, de giration dans la trace du faisceau sur le verre, a disparu.

Dans une ampoule où le vide est peu avancé, les rayons magnétocathodiques forment un faisceau qui s'arrête à peu de distance (quelques centimètres) de son point de départ. Cette distance augmente avec le champ magnétique qui semble ainsi être moteur pour ces rayons. Rien de semblable ne s'observe avec les rayons cathodiques ordinaires.

Si le champ n'est pas uniforme (ampoule posée sur un électro-aimant en fer à cheval), on a vu que les rayons cathodiques forment une spirale qui s'arrête à une certaine distance du pôle, puis rebrousse chemin ; mais cette spirale ne suit pas un tube de force, elle forme le zigzag déjà décrit. On peut essayer de lancer un rayon cathodique suivant une ligne de force ; il ne la suit que si elle est rectiligne, sinon il ne tarde pas à s'en écarter, ce qui est facile à vérifier en se plaçant dans le plan de symétrie passant par les pôles de l'électro-aimant. L'enroulement cathodique s'écarte visiblement de ce plan, le rayon magnétocathodique y reste toujours : il peut s'arrêter plus ou moins loin, suivant le degré de vide et la valeur du champ, jamais il ne rebrousse chemin comme la spirale cathodique.

Rien de tout cela ne constitue cependant une impossibilité absolue d'admettre la théorie de M. Fortin, parce que nous sommes loin de connaître toutes les propriétés des rayons cathodiques et même de savoir si celles que nous connaissons ne sont pas profondément variables avec la vitesse.

Quoi qu'il en soit, ces rayons magnétocathodiques présentent avec les rayons cathodiques une remarquable relation :

Quand un rayon cathodique est placé dans un champ magnétique intense, tous ses points émettent des rayons magnétocathodiques en lesquels il finit par se résoudre complètement.

En voici deux exemples :

Supposons un faisceau cathodique fin enroulé en circonférence ; disposons des écrans tels qu'aucune hélice (il y a toujours des rayons non exactement perpendiculaires au champ) ne puisse faire plus d'un demi-tour. Il suffira de prendre pour cela une lame quelconque placée parallèlement aux lignes de force, coupant ainsi longitudinalement tout cylindre d'enroulement. Malgré cela, on voit un cylindre lumineux

ayant pour base la circonférence cathodique et figurant un tube de force ; ce cylindre n'est pas constitué par des hélices, mais par des génératrices magnétocathodiques.

Formons une hélice cathodique bien nette, de pas défini par un diaphragme à trou placé après les deux premières spires par exemple. Si le champ est faible, cette hélice sera très nette, et atteindra la paroi sans affaiblissement appréciable (un rayon cathodique peut facilement atteindre 1 mètre de longueur) ; si le champ devient intense, l'hélice se resserre en restant semblable à elle-même, mais sa longueur, de la cathode à la paroi, reste invariable¹. Malgré cela, on voit facilement que le rayon cathodique n'atteint plus la paroi : l'hélice, toujours très nette, s'évanouit après huit ou dix spires ; le rayon cathodique a disparu, presque complètement, après un trajet inférieur à celui qu'il faisait d'abord.

Cependant le tube de force est toujours visible par fluorescence du gaz, jusqu'à la paroi. L'hélice s'est résolue en rayons magnétocathodiques et l'on en a la preuve en disposant une lame de mica, mobile à volonté, qu'on amène à couper le tube de force dans le sens de sa longueur ; tout ce qui s'enroule est ainsi arrêté. Or, si cette lame est placée à l'origine de l'hélice, elle supprime toute luminescence du gaz après elle ; mais, si elle est placée après la cinquième ou la sixième spire, ou mieux un peu plus loin encore, elle ne supprime presque plus rien, parce qu'il n'y a presque plus de rayons enroulés, mais seulement des rayons magnétocathodiques qui sont les génératrices du tube de force et qu'une lame parallèle à ces génératrices n'arrête naturellement pas.

L'interprétation est contrôlée par l'observation de la tache fluorescente produite par le bout du faisceau sur le verre. Comme on n'a jamais une hélice géométrique, mais une infinité d'hélices très voisines, cette tache se compose (dans un champ modéré) d'un arc de la courbe représentée figure 10. Cet arc pourra, si l'on veut, former presque un anneau complet. Si l'on fait varier le champ, il se déplace en tournant sur la courbe en question ; mais, si l'on coupe l'hélice cathodique en un point quelconque, tout l'arc fluorescent est supprimé.

Si au contraire on a un champ intense, le diaphragme longitudinal qui arrête les hélices ne supprime plus la tache fluorescente : celle-ci, qui est alors un anneau circulaire complet (trace du tube de force), est alors simplement coupée par l'ombre du diaphragme. Quand on fait varier le champ, le diamètre de l'anneau change, mais il reste toujours coupé de la même manière, sans aucune tendance à une rotation quelconque ; il est donc bien la trace, non d'hélices

1. Avec des faisceaux très fins l'enroulement est toujours facile à voir parce qu'il remplace le faisceau par le cylindre d'enroulement. Avec des rayons produits par 50000 volts, dans un champ de 500 unités, de diamètre plus grand, le diamètre de le cylindre est voisin de 2 cm. Pour qu'il descendit à 2 mm, il faudrait que la vitesse fût dix fois moindre, et le potentiel de décharge cent fois plus petit, soit 500volts.

1. Il suffit de considérer le rayon initial comme la diagonale d'un rectangle qu'on enroule successivement sur des cylindres d'un diamètre de plus en plus faible ; l'enroulement occupe toujours la même longueur sur le cylindre, et la longueur de l'hélice est aussi toujours la même, étant celle de la diagonale enroulée.

variables avec le champ mais de rayons rectilignes en lesquels s'est résolu le rayon cathodique enroulé d'abord en hélice¹.

Si l'on ajoute à ces singuliers rayons, variété ou non des rayons cathodiques, ceux de M. Goldstein, et les rayons cathodiques non déviables de M. J.-J. Thomson, on voit que nous sommes loin de savoir exactement en quoi consiste une décharge électrique.

Essai de théorie de l'aurore boréale. — M. Arrhénius a émis l'hypothèse que l'aurore boréale est due à des rayons cathodiques émanés du Soleil. C'est là une explication très plausible de l'origine ou de la cause principale du phénomène, mais cette hypothèse n'explique en rien les caractères de l'aurore elle-même, et dire qu'elle est formée de rayons cathodiques revient sensiblement à considérer l'aurore comme une décharge électrique dans un gaz raréfié, sans donner la raison des particularités qu'elle présente.

Les particularités en question sont les suivantes :

L'aurore affecte généralement une forme en 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 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 produisent l'enroulement composé en zigzag formant autour du Soleil une nappe de révolution dont les points d'émission feront partie, et qui, par suite, ne pourra s'écarter du Soleil à une distance supérieure à celle de ces points.

Le diamètre des spires d'enroulement sera lui-même

négligeable devant le diamètre du Soleil (dans un champ de 1/10 d'unité et pour des particules ayant la vitesse de la lumière, ce diamètre serait de 600 mètres environ).

Ainsi le champ magnétique solaire est incompatible avec l'arrivée des particules cathodiques sur la Terre ; l'hypothèse d'Arrhénius nous oblige 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.

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 modifiant la forme du champ et le trajet des particules pendant leur marche.

On peut peut-être admettre que ces particules d'origine solaire arrivent assez près des pôles terrestres pour rencontrer des cirrus (qui accompagnent toujours l'aurore).

Ces 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 les 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 (200 volts suffisent). La vitesse de ces rayons correspond à la chute du potentiel en question. Les cirrus, formés d'aiguilles de glace, 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.

Rien n'empêche d'admettre l'existence d'autres causes excitatrices d'origine cosmique, radiations ou rayons (on a vu qu'il en est d'insensibles au champ magnétique). Ce qui est essentiel, c'est d'avoir des rayons cathodiques d'origine terrestre.

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

1. Il n'y a pas allongement progressif du pas de l'hélice se transformant en ligne droite, car on la voit s'évanouir sans changer de pas : d'autre part, le diaphragme longitudinal arrêterait l'hélice même si elle tendait à se rapprocher progressivement d'une génératrice du cylindre,

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 figure 10 ; 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 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 rebrousseira 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 rebroussement, 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 figure 10 montre que, même si les directions sont un peu différentes, le reploiement de la spirale ne change pas de position ; d'où une condensation de lumière, un renforcement très visible résultant du tassement des spires vers le lieu de rebroussement¹.

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

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

2. Dans l'expérience de la figure 10, le faisceau cathodique est devenu presque invisible, par 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.

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 auroraux que le météore sera visible. Nous avons ainsi

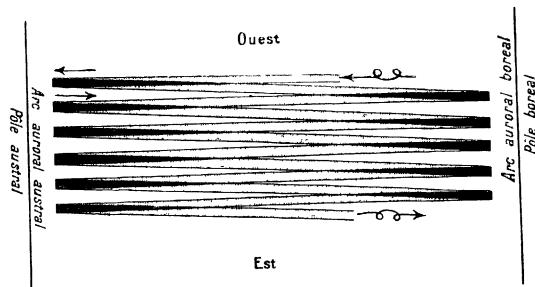


Fig. 14. — Figure schématique (planisphère) de l'enroulement cathodique auroral.

les rayons auroraux disposés en éventail sur l'arc auroral, 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 auroraux seront distincts, ce sera l'aurore classique en éventail. Si ce pas est moindre il y aura superposition partielle de deux rayons auroraux 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 rayonnement solaire (M. Buisson a montré que l'ultra-violet décharge les cristaux de glace électrisés négativement) ; 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 chance 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.

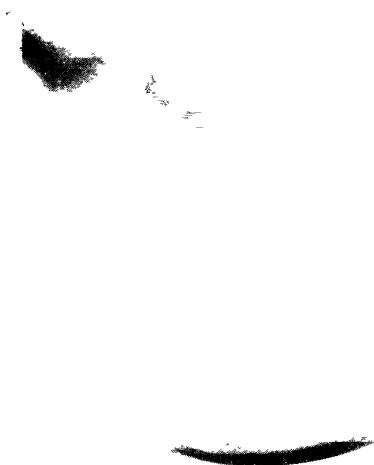


Fig. 15. — Enroulement composé en zigzag dans un champ en barillet. On voit le renforcement notable de la luminosité à chaque rebroussement. Le lieu des divers rebroussements est un petit cercle vu ici par sa tranche; à l'intérieur de ce petit cercle il n'y a pas de rayons cathodiques.

Supposons maintenant une perturbation magnétique ayant pour effet de changer la convergence du champ

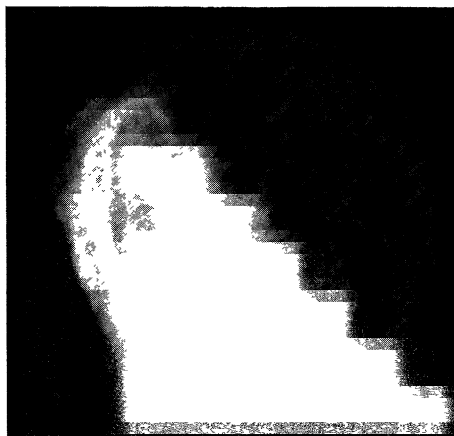


Fig. 16. — Aurore artificielle. Vue perspective à 45 degrés environ de l'axe du champ. (Le diamètre de l'ampoule, 18 centimètres, étant imposé par les dimensions de l'électro-aimant, il a été nécessaire, pour avoir des fuseaux cathodiques relativement serrés, de donner au champ une valeur élevée; il en est résulté, surtout près du pôle, une production de rayons magnéto-cathodiques plus forte que dans les deux enroulements précédents; de là une netteté beaucoup moindre de l'arc auroral à l'intérieur duquel pénètrent les rayons magnétocathodiques qui peuvent aller jusqu'au pôle).

vers le pôle (ce qu'on réalise expérimentalement en éloignant ou rapprochant l'un ou l'autre des pôles de l'électro-aimant). 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 pour 100 (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 pour 100; le troisième se déplace du double 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 figure 14 on resserre tous les fuseaux à la ma-

nière 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, et dans lequel on produit 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.

Ainsi, cette étude de l'électromagnétisme cathodique, poussée par l'expérience plus loin peut-être qu'on ne pourrait le faire par l'analyse, conduit non seulement à une explication vraisemblable d'un phénomène naturel remarquable, mais à la possibilité d'en discuter l'origine terrestre ou cosmique¹.

1. Les figures 15, 15 et 16 de ce travail nous ont été obligeamment communiquées par la Société Internationale des Electriciens.

