RÖNTGEN

LA THÉORIE MODERNE

DES

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

RADIOACTIVITÉ, IONS, ÉLECTRONS

Les radiations en physiologie et en médecine — par MM P. Oudin et A. Zimmern (Revue Scientifique du 17 Fev. 1912)

Augusto RIGHI

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE BOLOGNE

LA THÉORIE MODERNE

DES

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

RADIOACTIVITÉ, IONS, ÉLECTRONS

TRADUCTION LIBRE SUR LA 2e ÉDITION ITALIENNE ET NOTES ADDITIONNELLES

PAR

Eugène NÉCULCÉA

ATTACHÉ AU LABORATOIRE DES RECHERCHES PHYSIQUES DE LA SORBONNE

PRÉFACE

DE

G. LIPPMANN

MEMBRE DE L'INSTITUT ET DU BUREAU DES LONGITUDES
PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES

PARIS

ÉDITÉ PAR « *L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE* »

40, RUE DES ÉCOLES, 40

1906

PRÉFACE

M. le Professeur A. Righi s'est proposé d'exposer, sous une forme simple, cette théorie des électrons qui sert aujourd'hui à expliquer nombre de phénomènes récemment découverts. Il a réussi à montrer clairement, en peu de pages, les origines et le développement d'une féconde conception.

On sait que de merveilleux chapitres sont venus, en ces dernières années, s'ajouter à la physique : le phénomène de Zeeman, action exercée par le magnétisme sur l'émission de la lumière ; les rayons cathodiques de diverses espèces, suivis de près par les rayons de Roentgen ; l'ionisation des gaz, qui rend ces corps conducteurs de l'électricité ; enfin l'étonnante découverte des substances radioactives, de l'uranium, du radium, qui émettent spontanément, en même temps que leurs émanations, des radiations de même nature que celles que donne l'ampoule de Crookes.

Ce sont autant de parties nouvelles qui se sont développées séparément, jusqu'au jour où l'hypothèse des électrons a permis de les relier entre eux en fournissant à des phénomènes distincts une commune mesure.

M. Righi montre comment la notion de l'électron est sortie de l'hypothèse des ions. Il indique, sans longs calculs, comment on a pu déterminer les masses et les vitesses des électrons, et il a soin

d'ailleurs, de donner à chaque partie de son exposé un développement en rapport avec son importance actuelle dans la science. Lui-même, on s'en souvient, avait contribué, par d'ingénieuses expériences, à établir la théorie de l'ionisation des gaz. La résistance électrique d'une colonne gazeuse diminue dans certains cas lorsque la longueur augmente : M. Righi a fait voir que ce fait paradoxal au premier abord est une conséquence de la théorie des électrons et constitue une des meilleures preuves de leur existence.

L'électron est une charge électrique qui se déplace sans être liée à une masse matérielle : du moins la masse qui l'accompagne est mille fois moindre que dans l'ion, et paraît parfois se réduire à zéro. On est ainsi conduit à attribuer à l'électricité une structure atomique, même dans l'intérieur des conducteurs métalliques. Le mouvement d'un électron qui se déplace sans entraîner de masse pondérable implique l'existence d'une énergie qui n'est pas attachée à la matière. Cette conclusion n'a rien qui doive surprendre : une onde lumineuse, pendant qu'elle se propage dans le vide, contient une quantité finie d'énergie qui, à ce moment, est détachée de toute matière pondérable. L'éther lumineux serait le siège de l'énergie ainsi transportée : de même l'éther de Maxwell serait le siège de l'énergie entraînée par l'électron.

Certains auteurs de la théorie des électrons vont plus loin : ils croient possible de donner une théorie électromagnétique des propriétés de la matière pondérable : au lieu d'expliquer mécaniquement les phénomènes électriques, on explique électriquement les faits de la mécanique rationnelle.

M. Righi indique cette extension extrême de la théorie des électrons en faisant les réserves nécessaires : il faudrait pouvoir expliquer par une théorie purement électromagnétique non seulement l'inertie des corps pondérables, mais encore l'attraction newtonienne : si cette démonstration a été tentée, elle n'a pas été achevée.

Quoi qu'il en soit, M. Righi souligne « l'impos-« sibilité de trouver une représentation mécanique « suffisante des déformations électriques supposées « de l'éther, déformations auxquelles la théorie de « Maxwell attribue les forces apparentes à dis-« tance ». En d'autres termes, la mécanique rationnelle ne possèderait pas une généralité suffisante pour rendre compte de toutes les manifestations de l'énergie.

A l'appui de cette conclusion, je me permettrai d'ajouter la remarque suivante :

Lorsque l'on expose les éléments de la mécanique, on a l'habitude d'y introduire implicitement, en même temps que les principes de Newton, une relation supplémentaire qui restreint la généralité des applications : à savoir, la première loi de la chute des corps. D'après les principes de Newton, le quotient de la force par l'accélération est constant, c'est-à-dire indépendant de la valeur de la force. Il en est de même d'un deuxième point matériel, qui fournit un deuxième quotient. Vient-on à réunir les deux points matériels en un seul, on constitue un troisième point pour lequel on trouve un troisième quotient également constant, c'est-à-dire encore indépendant de la valeur de la force agissante. Les principes énoncés ne donnent pas autre chose. Or, l'on admet de plus que le troisième quotient est la

somme des deux premiers. Ceci ne résulte point des principes énoncés, c'est un corollaire implicite de la première loi de la chute des corps : tous les corps tombent dans le vide avec la même accélération. Si l'on se bornait aux principes en question, les inerties des divers points matériels seraient de simples quotients, constants quand on les prend séparément, mais non des grandeurs susceptibles d'addition. On a donc introduit dans la mécanique rationnelle, une condition qui en a diminué la généralité.

Enfin je rappellerai que le principe de la conservation de l'énergie s'explique sans peine par des hypothèses mécaniques; mais qu'il n'en est pas de même du second principe de la thermodynamique.

La théorie des électrons, comme celle de Maxwell, constitue donc une théorie en partie mécanique, qui permet d'expliquer plusieurs séries de phénomènes moléculaires, électriques et lumineux. C'est une théorie mécanique, puisqu'elle fait intervenir des forces, des déplacement, des vitesses, des accélérations, sous des formes analytiques qui sont celles de la mécanique rationnelle. Mais c'est une mécanique généralisée, car l'inertie et la force vive n'y sont plus liées à des masses pondérables, et la mécanique des corps pondérables n'en serait qu'un cas particulier.

G. Lippmann.

INTRODUCTION

Les innombrables recherches expérimentales de ces dernières années sur la décharge électrique, les tentatives heureuses faites pour compléter la théorie électromagnétique de la lumière et enfin la découverte des nouveaux phénomènes magnéto-optiques et celle de la radioactivité, ont eu pour conséquence la création d'une branche nouvelle et intéressante de la science et ont fait naître en même temps une théorie qui groupe ces faits harmonieusement : les idées dominantes sur la cause immédiate des phénomènes électriques, et généralement, des phénomènes physiques, en ont été profondément modifiées.

Après l'abandon de l'ancienne hypothèse des fluides, causé surtout par la répugnance à admettre les actions à distance, il sembla d'abord que les idées de Faraday, précisées par Maxwell, idées suivant lesquelles le siège des phénomènes électriques doit se trouver dans l'éther plutôt que dans les corps dits électrisés, conduiraient à une nouvelle conception de ces phénomènes ; mais l'impossibilité de trouver une représentation mécanique satisfaisante des déformations élastiques supposées de l'éther, déformations auxquelles la théorie de Maxwell attribue les forces apparentes à distance, et la nécessité d'admettre de toute manière l'existence d'une entité distincte de l'éther et de la matière, montrèrent bientôt que, dans le nouvel ordre d'idées, l'électricité demeurait encore une inconnue.

Aujourd'hui une nouvelle évolution s'est produite et bien que la cause première nous échappe encore, *l'on attribue à l'électricité une structure atomique.* Cette nouvelle conception, suggérée par les études auxquelles nous avons fait allusion plus haut, semble déjà être aussi féconde que la conception analogue, depuis longtemps admise, sur la constitution de la matière : elle permet d'établir d'étroites relations réciproques, souvent même quantitatives, entre des phénomènes en apparence très disparates et indépendants les uns des autres.

Ce que sont les électrons ou atomes électriques, on l'ignore encore, mais la nouvelle théorie n'en gagnera peut être pas moins d'importance au point de vue philosophique : elle aura, en effet, indiqué une nouvelle manière de considérer la structure de la matière pondérable, et elle aura ramené à une origine unique tous les phénomènes du monde physique.

A vrai dire, avec les tendances modernes, positivistes et utilitaires, beaucoup n'apprécieront peut-être pas cette valeur philosophique. Ils préfèreront considérer avant tout une théorie comme un moyen commode d'ordonner et de coordonner des faits, et comme un guide pour la recherche de nouveaux phénomènes ; mais si, dans le passé, on a trop eu confiance dans la puissance du génie humain, se croyant ainsi trop facilement très près de découvrir la raison suprême des choses, on tombe à présent dans l'excès contraire.

Nous exposerons ici les principaux faits qui ont conduit à la théorie des électrons et nous chercherons à faire connaître cette théorie en en traçant du moins les grandes lignes.

CHAPITRE I

IONS ELECTROLYTIQUES ET ELECTRONS

Pour expliquer le phénomène de l'électrolyse, qui est régi par les lois bien connues de Faraday, l'on admet, avant tout, l'hypothèse de la dissociation électrolytique.

Toute molécule d'un électrolyte peut se séparer en deux *ions*, c'est-à-dire en deux atomes ou groupes atomiques possédant des charges égales et de signes opposés ; ainsi quand un sel, comme le chlorure de sodium, par exemple, vient d'être dissous dans l'eau, une partie de ses molécules se dissocie, c'est-à-dire que ces molécules cessent d'exister comme telles, et leurs ions sont mis en liberté. C'est en vertu de ces mouvements moléculaires et atomiques invisibles, dont l'énergie constitue la chaleur interne des corps, que les ions errent dans le liquide ; mais sans qu'il y ait de direction préférée.

Leurs chocs (collisions), réciproques ou avec des molécules, donnent naissance soit à une séparation de molécules en ions, soit à la recombinaison de deux ions distincts en une molécule.

Il se produit, pour ainsi dire, d'incessantes unions et désunions d'ions, à la suite desquelles le nombre des molécules dissociées continue à demeurer sensiblement invariable.

Mais lorsque deux électrodes, communiquant avec les pôles d'une pile, sont immergées dans la solution de chlorure de sodium que nous avons considérée, les deux espèces d'ions (dans l'exemple adopté, les ions positifs de sodium et les ions négatifs du chlore) ne jouissent plus de la liberté de pouvoir décrire des trajectoires quelconques dans leur mouvement : ils obéissent aux forces électriques qui dirigent les premiers vers l'électrode négative ou *cathode*, et les seconds vers l'électrode positive ou *anode*. Une fois en contact avec les électrodes, les ions cèdent à ces dernières leurs charges et deviennent ainsi des atomes neutres, qui restent en liberté ; à moins qu'il n'y ait quelque action chimique spéciale entre ces atomes et les corps environnants.

C'est ce transport de l'électricité effectué par les ions qui constitue le courant électrique dans le liquide.

On sait que l'électrolyse obéit aux deux lois bien connues de Faraday. La première de ces deux lois indique la proportionnalité entre la quantité d'électricité qui traverse le liquide et la quantité de matière déposée sur les électrodes. Pour satisfaire à cette loi, on admet que tous les ions existant dans le liquide possèdent des charges égales en valeur absolue. Ainsi, dans le cas du chlorure de sodium, les ions du sodium ont tous des charges positives égales entre elles, et égales en valeur absolue aux charges négatives des ions du chlore.

Quant à la seconde loi de Faraday elle établit que, lorsqu'une même quantité d'électricité traverse des électrolytes différents (insérés en série dans un même circuit, par exemple), le poids du métal déposé sur chaque électrode est proportionnel à l'équivalent

chimique du métal en question : les quantités décomposées de ces électrolytes sont proportionnelles aux équivalents chimiques respectifs ; cette loi est satisfaite si l'on admet que tous les atomes monovalents possèdent, en valeur absolue, une charge égale à celle des ions du sodium ou du chlore ; que tous les atomes *bivalents* ont une charge *double* de celle-là, et ainsi de suite. Un exemple fera mieux comprendre ce point.

Faisons passer un courant électrique, en même temps, dans une solution de chlorure cuivreux ($Cu^2 Cl^2$) où deux atomes de cuivre sont unis à deux atomes de chlore et dans une solution de chlorure cuivrique ($Cu Cl^2$) où un atome de cuivre est uni à deux atomes de chlore (il suffira de mettre ces solutions dans un même circuit) ; en vertu de ce qui précède, on recueillera sur la cathode plongeant dans la première solution une quantité de cuivre double de celle qui se déposera sur la cathode plongeant dans la seconde, alors que la quantité d'électricité positive transportée à travers le liquide sera la même dans les deux cas.

L'illustre Helmholtz montra vers 1881 comment des lois de l'électrolyse se dégage l'idée, que la charge électrique correspondant à chaque valence d'un ion est une quantité fixe ayant une existence individuelle. Or, l'atome matériel est une portion fixe et déterminée d'une certaine quantité de matière, et il est considéré comme étant indivisible ; il est donc naturel de regarder cette charge électrique comme fixe et indivisible, et cela d'autant plus qu'on n'a jamais rencontré de quantité d'électricité plus petite que cette dernière. La charge de l'ion (monovalent) peut par suite être dénommée *atome d'électricité*, ou

électron (ion électrique), suivant le terme proposé par M. Johnstone Stoney.

En vérité, la conception d'une structure atomique de l'électricité revient à Weber, qui l'a émise vers 1871. Cet illustre physicien et mathématicien proposa, comme on le sait, une théorie, suivant laquelle les phénomènes électriques seraient dus à des particules ou atomes d'électricité positive et d'électricité négative agissant les uns sur les autres, avec des forces dépendant non seulement de leur distance, mais aussi de leurs accélérations, c'est-à-dire de la manière dont les vitesses varient. Cette théorie, qui suppose des actions à distance, n'a pourtant de commun avec la théorie actuelle que la conception fondamentale de l'atome électrique; et bien que Weber, à la suite des recherches sur la nature des forces qui président à la structure atomique des corps, ait émis l'hypothèse « qu'à tout atome pondérable est joint un atome électrique » [1], la relation actuellement admise entre les ions et les électrons semble avoir été mieux entrevue par Helmholtz.

Hâtons-nous d'ajouter que l'hypothèse atomique de l'électricité ne conduit pas nécessairement à considérer cette dernière comme une substance matérielle; on est toujours libre, en effet, de supposer *qu'un électron est simplement une condition spéciale et localisée de l'éther universel.* Il y a lieu de faire remarquer qu'on est plutôt conduit aujourd'hui à admettre l'hypothèse diamétralement opposée: hypothèse d'après laquelle les atomes des divers corps ne seraient que des systèmes d'électrons.

---

[1] W. Weber. — *Gesammelte Werke,* t. IV, p. 279.

Mais revenons à notre électrolyse. Donc, lorsque les ions arrivant sur les électrodes deviennent atomes neutres, les électrons entrent en circuit pour constituer le courant électrique. Il semble maintenant naturel de supposer que ces électrons, avant de se fondre, pour ainsi dire, en un tout homogène (l'ancien fluide électrique, par exemple) conservent leur individualité ; d'autant plus que, s'ils doivent voyager d'un atome à un autre, il est vraisemblable qu'ils doivent momentanément exister isolés.

Le courant électrique dans les conducteurs ne serait donc autre chose qu'un mouvement d'électrons libres à travers les espaces interatomatiques. Mais il faut, en outre, préciser et voir si le courant consiste dans le mouvement des électrons positifs dans un sens et des électrons négatifs en sens contraire, ou bien dans le mouvement dans un sens déterminé de l'une des deux espèces d'électrons, des électrons négatifs, par exemple.

C'est cette dernière opinion qui a été préférée, et cela parce que l'on a des raisons de croire que, seuls, les électrons négatifs peuvent exister librement. Ce sont seulement ces derniers, à ce qu'il semble, qui se déplacent, qui se séparent de la matière pondérable ou qui s'y réunissent, et qui vibrent dans les sources lumineuses, ainsi qu'on le verra plus loin. C'est ainsi que, pendant qu'un ion négatif se déposant sur l'anode cède à celle-ci l'électron négatif, un ion positif arrivant sur la cathode ne cède pas d'électron positif à cette dernière, mais en prend, au contraire, un négatif.

Voilà donc, dans une certaine mesure, l'ancienne théorie du fluide électrique rappelée à la vie, quoique profondément modifiée. On ne parle plus, en effet,

ici, de fluide continu ; on a maintenant des atomes spéciaux (les électrons) et, ainsi qu'on l'a déjà fait observer, on n'est même pas obligé de les considérer comme matériels au sens ordinaire du mot.

En outre, et cela a beaucoup plus d'importance pour nous, on n'attribue plus aux atomes d'électricité cette mystérieuse faculté d'agir à distance, qu'on attribuait au fluide électrique. L'on admet maintenant que les forces réciproques entre les électrons ont leur cause dans des déformations élastiques spéciales de l'éther, déformations identiques à celles invoquées par la théorie de Maxwell pour rendre compte des forces électriques entre les conducteurs.

En ce qui concerne le phénomène de l'électrolyse, il suffirait, à la rigueur, pour l'expliquer, d'admettre l'hypothèse de la dissociation électrolytique ainsi qu'on l'a toujours fait; mais cette hypothèse ne se prête pas bien à l'explication de la propagation de l'électricité dans les gaz et des divers autres phénomènes. En admettant la *dissociation électrique*, c'est-à-dire la séparation des électrons négatifs des atomes neutres, on arrive, au contraire, à rendre compte et de l'électrolyse et des autres phénomènes.

Pour qu'un électron négatif puisse être séparé d'un atome neutre, il faut dépenser une certaine quantité d'énergie, destinée à vaincre l'attraction en vertu de laquelle l'électron est retenu par l'ion positif (ce dernier étant ce qui reste de l'atome quand on lui a enlevé l'électron négatif), de même qu'il faut dépenser de l'énergie calorifique pour séparer les unes des autres les molécules d'un liquide qu'on évapore, ou de même qu'il faut dépenser du travail pour soulever un poids du sol.

Cette énergie nécessaire pour *ioniser* ou *dissocier* un atome est, naturellement, différente suivant la nature chimique de ce dernier. L'expérience nous apprend qu'elle est minima pour les corps dits électro-positifs, tels que les métaux, et infiniment plus grande pour la catégorie des corps électro-négatifs, aux atomes desquels peuvent en outre être assimilés de nouveaux électrons négatifs; de plus, cette énergie dépend de la nature et des conditions des atomes qui se trouvent autour de l'atome qui doit se diviser en électron et ion positif; elle est extrêmement petite pour les corps en solution aqueuse.

Cela posé, la dissociation électrolytique, c'est à dire la séparation d'une molécule en deux ions (par exemple, la séparation de la molécule de chlorure de sodium en un ion positif de sodium et un ion négatif de chlore) doit être considérée comme une conséquence de la dissociation de l'atome métallique. Celui-ci se divise en un ion positif de sodium et en un électron négatif lequel, retenu par l'atome du chlore, transforme ce dernier en un ion négatif.

Cette manière d'envisager la dissociation électrolytique, une fois adoptée, elle rentre, ainsi que ses conséquences importantes, dans la théorie plus générale des *électrons*, dont nous allons maintenant nous occuper.

CHAPITRE II

LES ÉLECTRONS ET LES PHÉNOMÈNES LUMINEUX

Nous venons de voir comment l'hypothèse des électrons résulte de la manière la plus naturelle de considérer les phénomènes électrolytiques; mais c'est dans un tout autre champ de la physique, — dans l'optique — qu'elle trouve une brillante et inattendue confirmation.

On sait que les belles et classiques expériences auxquelles sont attachés les noms illustres de Young, Fresnel et Foucault, ont contribué à démontrer de la manière la plus rigoureuse et la plus élégante, que la lumière est un phénomène vibratoire, et que l'hypothèse de Newton qui donna naissance à la théorie de l'émission — suivant laquelle tout corps lumineux émet des corpuscules spéciaux — doit, par suite, être définitivement abandonnée.

Les recherches célèbres de Macedonio Melloni [1]

---

[1] Des recherches bibliographiques précises conduisent à donner la priorité de cette idée au grand savant français Ampère (voir Ampère, *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. LVIII, p. 432 (1835)) : c'est lui qui, le premier, sut tirer la conclusion définitive : les rayons lumineux et les rayons calorifiques constituent des phénomènes de même nature, qui se transmettent sous forme d'ondes, dans le même milieu et ne diffèrent que par la longueur de ces ondes. En d'autres termes, les rayons lumineux sont des rayons calorifiques visibles. Ajoutons, en outre, que cette idée d'Ampère trouva *au début* des adversaires sérieux, parmi lesquels, précisément, Melloni (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. LX, p. 418 (1835), et Forbes (*Phil. Trans.*, Edinburgh, t. XIII, p. 131 (1836). [E. N.]

ont, d'autre part, établi l'identité entre la nature des phénomènes lumineux et celle des radiations calorifiques: deux phénomènes en apparence si divers.

Il est également reconnu que cette théorie ondulatoire de Fresnel exige l'existence d'un milieu capable de propager les ondes: d'où la nécessité d'admettre l'existence de *l'éther*, substance répandue partout, aussi bien dans les espaces interplanétaires et interstellaires que dans les espaces interatomiques. Cette hypothèse de l'éther s'impose d'une manière irrésistible et semble presque acquérir les caractères de réalité et de certitude, quand on considère la perfection avec laquelle la théorie ondulatoire rend compte quantitativement et dans les plus menus détails de tous les phénomènes optiques.

A l'exemple de Fresnel, on a continué pendant longtemps à considérer les vibrations lumineuses comme des vibrations mécaniques de particules éthérées et matérielles ; mais on a reconnu plus tard, surtout après les travaux de Maxwell, que l'on pouvait considérer les ondes lumineuses comme des ondes électromagnétiques, et réduire ainsi en une seule deux classes distinctes de phénomènes physiques.

Cette théorie électromagnétique de la lumière a trouvé, dans ces dernières années, un solide appui dans les expériences bien connues de Hertz et, depuis, dans celles de divers autres physiciens, de sorte qu'aujourd'hui on ne se refuse plus à admettre que, en réalité, les phénomènes lumineux sont des phénomènes électromagnétiques, et que les ondes lumineuses ne diffèrent des ondes hertziennes que par certaines valeurs numériques.

Cependant la théorie électromagnétique de la lumière, telle qu'elle se dégage des propriétés du

champ électromagnétique, ne rend pas compte, à elle seule, des phénomènes qui exigeaient, lorsque l'on adoptait la théorie mécanique, l'hypothèse d'une action de la matière pondérable sur l'éther. Pour compléter la théorie électromagnétique, il était donc nécessaire de faire intervenir en quelque sorte les atomes matériels. Ce fut le physicien hollandais Lorentz qui eut l'heureuse idée de considérer à la fois les atomes matériels et leur charge électrique. Ces charges peuvent être positives ou négatives, mais on doit supposer que les positives seulement ou les négatives seulement prennent part aux vibrations lumineuses et engendrent des forces électriques et magnétiques. C'est en tenant compte de ces forces qu'on arrive à une théorie électromagnétique de la lumière permettant d'expliquer les phénomènes qui échappaient à la théorie basée uniquement sur les formules de Maxwell ou de Hertz.

Nous allons maintenant considérer un phénomène très intéressant, découvert par M. Zeeman, élève de Lorentz, qui nous démontrera l'indépendance relative des électrons négatifs et la liberté caractéristique de leurs mouvements.

Nous savons qu'un gaz lumineux émet des radiations, dont les périodes vibratoires sont bien déterminées mais isolées, c'est-à-dire ne se suivant pas avec continuité ; aussi le spectre de la lumière émise par un gaz se réduit-il à un nombre limité de raies fines (spectre de lignes), qui sont autant d'images de la fente à travers laquelle on dirige la lumière avant de l'analyser au moyen d'un prisme ou d'un réseau.

C'est ainsi que le spectre de la lumière émise par le sodium à l'état gazeux, par exemple, contient, deux raies jaunes extrêmement voisines (désignées

par la lettre D, affectée respectivement des indices 1 et 2 : D_1 et D_2) qui, avec un spectroscope peu puissant, paraissent confondues en une seule.

Zeeman démontra que, si le gaz est placé dans un champ magnétique intense (entre les deux pôles d'un puissant électroaimant, par exemple) chaque raie simple de son spectre est remplacée généralement par un groupe de raies nouvelles.

Deux cas principaux sont à considérer :

1° *Le rayon lumineux est parallèle aux lignes de force magnétique ;*

2° *Le rayon lumineux est perpendiculaire aux lignes de force magnétique.*

Quant au cas général, il est naturellement plus

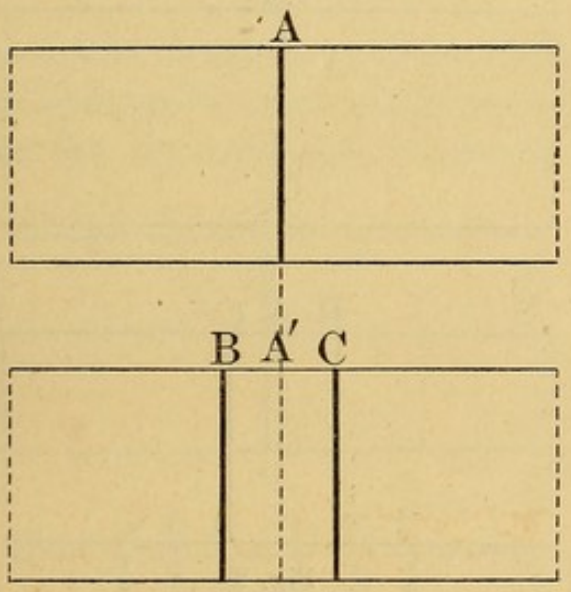

Fig. 1

compliqué, et nous nous bornerons à renvoyer le lecteur à des mémoires originaux [1].

Considérons donc un gaz lumineux, de la vapeur de cadmium, par exemple, placée entre les deux pôles opposés d'un électroaimant ; cette vapeur de

[1] A. Righi. — *Mem. della R. Acc. di Bologna*[V], t. VIII, p. 263, 1900.

cadmium peut être obtenue facilement en faisant éclater des étincelles électriques entre deux fils de cadmium métallique. Si l'on examine au moyen d'un spectroscope la lumière qui se propage *dans le sens des lignes de force* (premier cas), c'est-à-dire d'un pôle de l'aimant vers l'autre, l'on constate facilement que la raie verte du spectre du cadmium, qui, en l'absence de champ magnétique, apparaît simple et nette dans le spectroscope (A, fig. 1), est remplacée, dès que l'on lance le courant dans la bobine de l'électroaimant, par deux autres raies nouvelles B et C, une de chaque côté et à égale distance de la raie primitive A, qui a disparu.

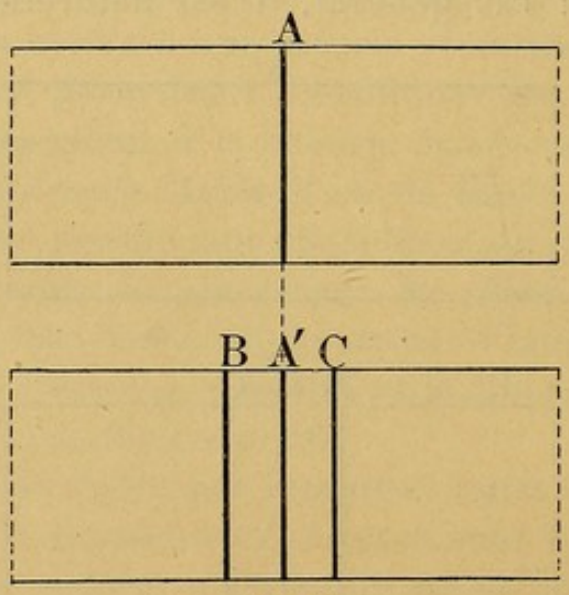

Fig. 2

Si l'on étudie un faisceau de lumière dirigé *perpendiculairement* à la direction du champ magnétique, c'est-à-dire perpendiculairement aux lignes de force magnétique (deuxième cas), et qu'on le reçoive dans un spectroscope, on constate que la raie primitive unique A est remplacée par trois raies B, A′, C (fig. 2), dont la raie médiane, A′, équidistante des deux au-

tres B, C, occupe exactement la même position que la raie primitive.

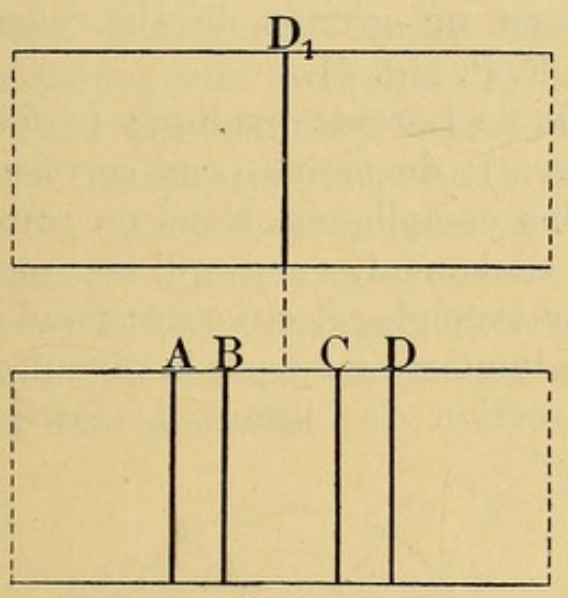

Fig. 3

Des phénomènes identiques sont observés avec d'autres raies spectrales; avec certaines autres raies, le phénomène est, au contraire, beaucoup plus com-

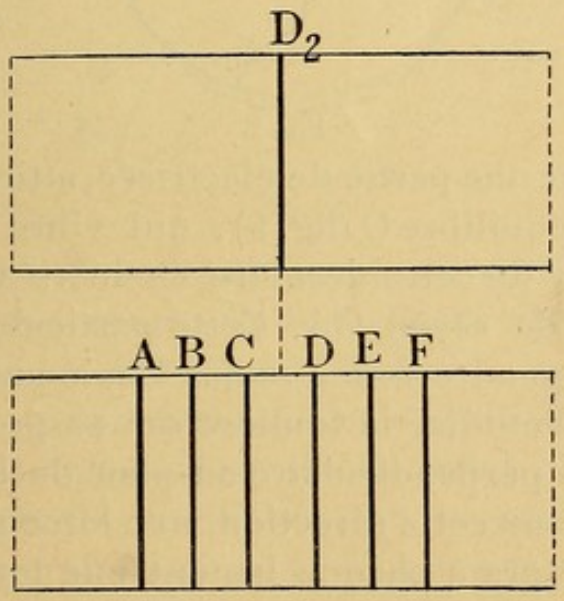

Fig. 4

plexe. Ainsi, par exemple, pendant que la raie D_1 du doublet jaune du sodium se décompose en quatre raies différentes A, B, C, D, (fig. 3) sous l'action d'un

champ magnétique perpendiculaire au faisceau lumineux (deuxième cas), la raie D_2 du même doublet se décompose en un groupe de six raies distinctes A, B, C, D, E, F, (fig. 4).

La théorie de Lorentz explique parfaitement ces phénomènes [1]; du moins ceux correspondant aux cas les moins compliqués. Nous ne considérons ici qu'un cas seulement, celui qui se rapporte à la figure 1, par exemple, et qui correspond à celui présenté par la lumière émise par la vapeur de cadmium dans la direction des lignes de force du champ magnétique.

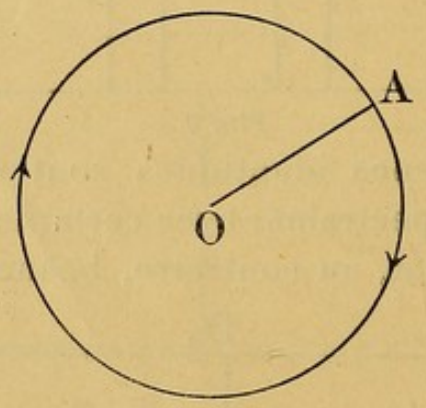

Fig. 5

Supposons une particule électrisée, attirée vers une position d'équilibre O (fig. 5), qui vibre circulairement autour de cette dernière en décrivant une circonférence de rayon OA. Cette particule électrisée vibrante engendrera des ondes lumineuses. Proposons-nous d'étudier la lumière qui se propage dans la direction perpendiculaire au plan de la circonférence. Si, dans cette direction, une force magnétique agit, il existera à chaque instant une force électromagnétique analogue à celle qui agirait sur un élément de courant électrique dirigé suivant la vitesse

[1] Voir à ce sujet, H. Poincaré, *Électricité et Optique*, 2e édition, chapitre VIII. (Paris, 1901). [E. N.]

de la particule. Cette force sera donc dirigée suivant le rayon OA passant par la particule mobile, et agira, suivant le cas, de A vers O ou en sens contraire. L'effet de cette nouvelle force, qui s'ajoute ou se retranche de celle qui maintient la particule dans son orbite, est de faire varier la période vibratoire de cette particule, c'est-à-dire de faire varier le temps employé par cette dernière pour décrire une circonférence ; de même qu'un changement dans l'intensité de la pesanteur, amène une variation dans la période d'oscillation d'un pendule.

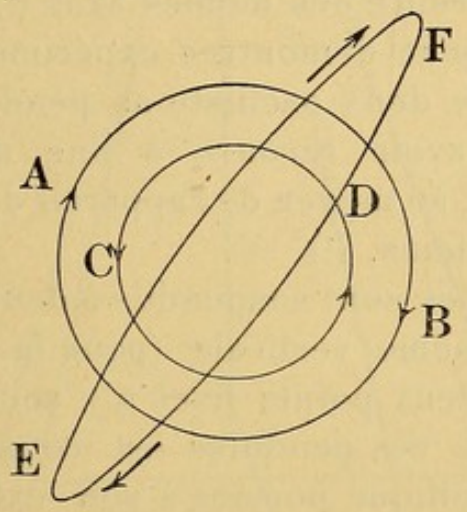

Fig. 6

Il est maintenant facile de passer de l'effet produit par le champ magnétique sur une vibration circulaire à celui produit sur une vibration de forme quelconque. Voyons comment. Les vibrations lumineuses sont parfaitement déterminées : elles obéissent aux lois des petites oscillations d'un pendule et elles sont en général elliptiques ; dans des cas particuliers, elles peuvent être rectilignes ou circulaires mais elles sont toujours transversales, c'est-à-dire qu'elles s'effectuent dans un plan perpendiculaire au rayon lumineux. Or, l'on peut démontrer que, cinématique-

ment parlant, toute vibration elliptique peut être considérée comme résultant de deux vibrations circulaires dont les sens de rotation sont opposés : l'une étant dextrogyre (le sens de rotation coïncidant avec celui des aiguilles d'une montre), et l'autre lévogyre (rotation dans le sens contraire de celui des aiguilles d'une montre). La vibration circulaire A B ayant, en outre, le même sens de rotation que celui de l'ellipse E F (fig. 6), elle a son diamètre égal à la demi-somme des axes de l'ellipse, pendant que le diamètre de l'autre vibration circulaire C D, est égal à la demi-différence des mêmes axes [1].

Mais l'on peut démontrer expérimentalement la composition de deux oscillations pendulaires circulaires, sans avoir recours à une démonstration mathématique, au moyen de l'appareil dont la figure 7 indique le schéma. [2]

Deux pendules sont suspendus à deux points fixes situés sur la même verticale (pour la simplicité de la figure, ces deux points fixes n'y sont pas représentés). Un de ces pendules est constitué par un simple fil métallique portant à son extrémité inférieure un anneau pesant qui sert de support à un entonnoir A, rempli de sable. L'autre pendule est constitué par quatre fils métalliques, partant du même

---

(1) En effet, une vibration elliptique rapportée à ses axes, peut être représentée au moyen de ses composantes rectilignes

$$x = a \sin \theta \quad \text{et} \quad y = b \cos \theta ;$$

elle équivaut évidemment à la résultante de deux vibrations circulaires : l'une dextrogyre, comme l'ellipse donnée, ayant pour composantes

$$x = \frac{a+b}{2} \sin \theta \quad \text{et} \quad y = \frac{a+b}{2} \cos \theta$$

et l'autre levogyre dont les composantes sont

$$x = \frac{a-b}{2} \sin \theta, \quad y = -\frac{a-b}{2} \cos \theta$$

(2). A. Righi. — *Rend. della R. Acc. di Bologna*, 18 Febraio 1894.

point de suspension, et supportant une planche B C, située au-dessous de l'entonnoir A et pourvue d'un entonnoir D analogue au premier et également rempli de sable. La longueur du premier pendule peut être modifiée à volonté, mais on doit, en vue de

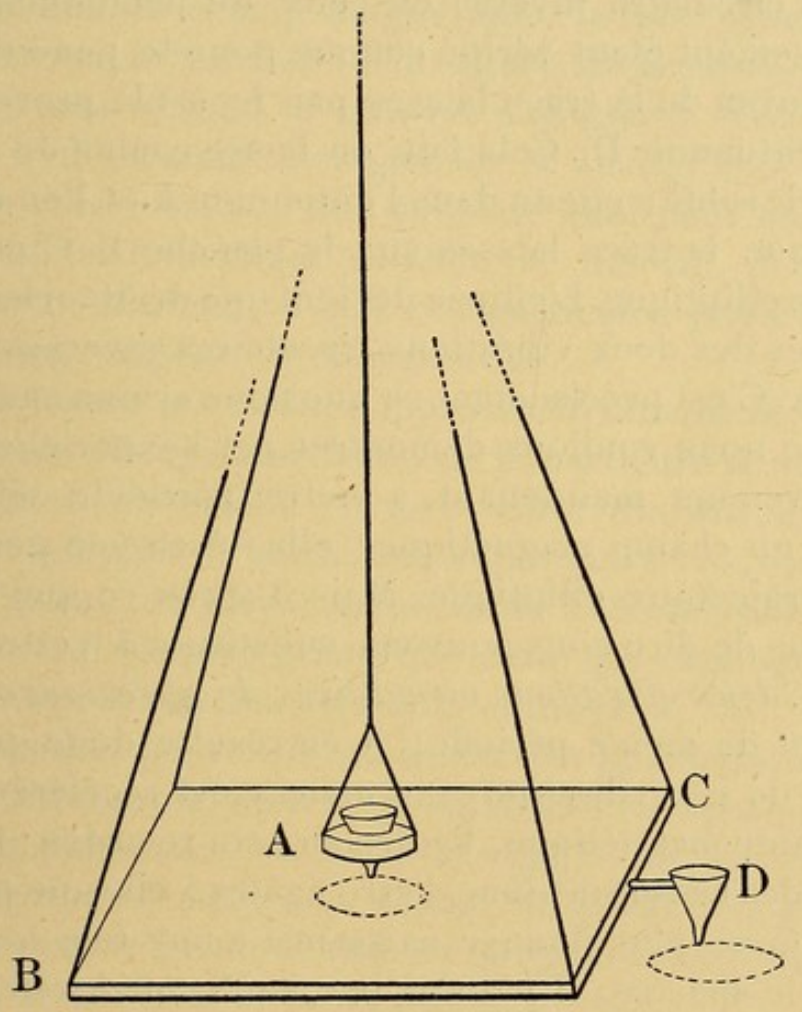

Fig. 7

l'expérience que nous nous proposons d'effectuer, la choisir de telle manière que les périodes d'oscillations des deux pendules soient égales. Au moyen d'un dispositif électrique facile à imaginer, l'on peut commander à distance l'ouverture ou la fermeture des deux entonnoirs à sable, de manière à ne laisser couler ce dernier qu'au moment propice.

On commence par donner un mouvement circulaire au pendule A (facile à reconnaître à la trace de sable laissée sur la planche B C, cette dernière étant supposée immobile), et l'on met ensuite en mouvement le second pendule en lui imprimant un mouvement circulaire inverse de celui du pendule A (ce mouvement étant vérifié comme pour le pendule A, au moyen de la trace laissée par le sable provenant de l'entonnoir D). Cela fait, on laisse couler de nouveau le sable contenu dans l'entonnoir A et l'on constate que la trace laissée sur la planche B C est de forme elliptique. L'ellipse devient une droite si les diamètres des deux vibrations circulaires inverses sont égaux. C'est précisément ce que nous avions annoncé et que nous voulions démontrer par l'expérience.

Revenons maintenant à notre particule vibrant dans un champ magnétique ; elle décrira en général une trajectoire elliptique. Mais d'après ce que nous venons de dire nous pouvons substituer à cette dernière, *deux vibrations circulaires de gyrations opposées* et de même période ; il en résulte donc que si l'une de ces vibrations circulaires est accélérée par le champ magnétique, l'autre en sera retardée ; leurs périodes cesseront donc d'être égales ; elles ne pourront donc plus donner naissance à une raie unique dans le spectre : il y aura, par suite, *dédoublement* de la raie primitive en deux autres raies situées de part et d'autre de la place occupée par la première.

Cette explication du phénomène de Zeeman est celle qui se dégage de la théorie de Lorentz ; elle a, en outre, été confirmée par de nouvelles expériences de Zeeman, qui a pu constater que les deux nouvelles raies étaient effectivement polarisées circulairement, et que l'une d'elles était dextrogyre et

l'autre lévogyre, conformément à la théorie de Lorentz.

D'autres expériences qualitatives et quantitatives permirent ensuite de dégager du phénomène de Zeeman deux autres résultats de grand intérêt.

En cherchant à distinguer, pour une direction déterminée du champ magnétique, la raie polarisée circulairement à droite (dextrogyre) de la raie polarisée circulairement à gauche (lévogyre), l'on est arrivé à déterminer le signe de la charge des particules vibrantes, et l'on a constaté que, pour mettre d'accord les faits observés avec la théorie, il était nécessaire d'admettre que ces particules possèdent une charge *négative* et non positive.

On a même pu évaluer approximativement le rapport de la charge électrique de la particule vibrante à sa masse matérielle ; d'après cette évaluation, ce rapport est plus de mille fois supérieur à celui relatif à l'atome de l'hydrogène dans l'électrolyse, et, *a fortiori*, il est plus grand que celui qui correspond aux atomes des autres éléments chimiques.

Ce résultat peut être interprété de plusieurs manières différentes, dont voici les deux principales :

1° *Les particules vibrantes seraient bien des ions électrolytiques, mais leur charge ne serait plus celle correspondant à chaque valence, d'après l'électrolyse; elle lui serait plus de mille fois supérieure.*

2° *Les particules vibrantes auraient bien la même charge que les ions électrolytiques, mais leur masse serait de plus de mille fois inférieure à celle d'un ion d'hydrogène.*

C'est cette seconde interprétation qui a été acceptée, et l'on considère les particules vibrantes comme des électrons libres. Ces électrons possèdent donc une très faible masse matérielle ; nous verrons d'ail-

leurs que cette masse doit problablement avoir une cause électromagnétique. Quoiqu'il en soit, cette interprétation est justifiée par les résultats auxquels on parvient par d'autres voies, ainsi que nous le verrons dans la suite.

Les expériences de Zeeman fournissent donc une éclatante confirmation de la théorie de Lorentz, et nous pouvons admettre que la structure des atomes matériels est telle, qu'elle permet aux électrons négatifs qui en font partie de vibrer librement, pendant que la partie positive de l'atome reste immobile. Nous nous figurerons par suite un atome neutre comme étant constitué d'une portion qui, dans son état complexe, a une charge positive et d'un ou plusieurs électrons négatifs qui se meuvent autour de cette portion positive à la manière des satellites autour d'une planète, en décrivant des orbites sous l'action des forces électriques.

Ceci admis, allons plus loin. Tout le monde sait actuellement ce qu'est un oscillateur et connaît son emploi pour la production d'ondes électromagnétiques. Considérons la forme la plus simple d'oscillateur : un corps électrisé doué d'un mouvement vibratoire (fixé sur un diapason en vibration, par exemple). Remplaçons le corps électrisé par un électron ; donnons en outre une période vibratoire extrêmement courte au corps vibrant (une très faible fraction de la seconde, ayant pour numérateur l'unité, et pour dénominateur un nombre entier de *quinze* chiffres). *Eh bien, dans ces conditions, notre oscillateur, au lieu de produire des ondes électromagnétiques de Hertz, engendrera des ondes lumineuses ordinaires.*

CHAPITRE III

NATURE DES RAYONS CATHODIQUES [1]

Dans les phénomènes, dont nous nous proposons de donner ici une idée, entrent en jeu des électrons négatifs animés de mouvements de translation très rapides et non plus du mouvement vibratoire dont nous avons parlé dans le chapitre précédent. Nous commencerons, pour la clarté de l'exposition, par rappeler d'abord les principaux caractères présentés par les décharges électriques dans les gaz raréfiés.

Considérons un tube de verre AC fermé (fig. 8), aux extrémités duquel sont soudés deux fils de platine portant deux électrodes en aluminium *a*, *c*; lorsque la pression de l'air contenu dans ce tube n'est pas trop inférieure à la pression atmosphérique (8 à 10 mm. de mercure, par exemple), si l'on fait passer le courant entre les deux électrodes, au lieu de l'étincelle brillante et quelquefois ramifiée qu'on

---

[1] Le lecteur, désireux d'acquérir des connaissances plus profondes sur la matière qui fait l'objet de ce chapitre, pourra lire avec profit les ouvrages suivants :

J. Stark, *Die Elektrizität in Gasen.* (Amb. Barth. éditeur. Leipzig. 1902).

O. Lodge. *Journ. of the Inst. Elect. Eng.*, t. XXXII ; 1903.

J.-J. Thomson, *Conduction of Electricity through Gases* (Cambridge University Press. 1903).

obtient dans l'air à la pression atmosphérique, on obtient un tout autre phénomène lumineux, très caractéristique et qu'on peut séparer en deux par-

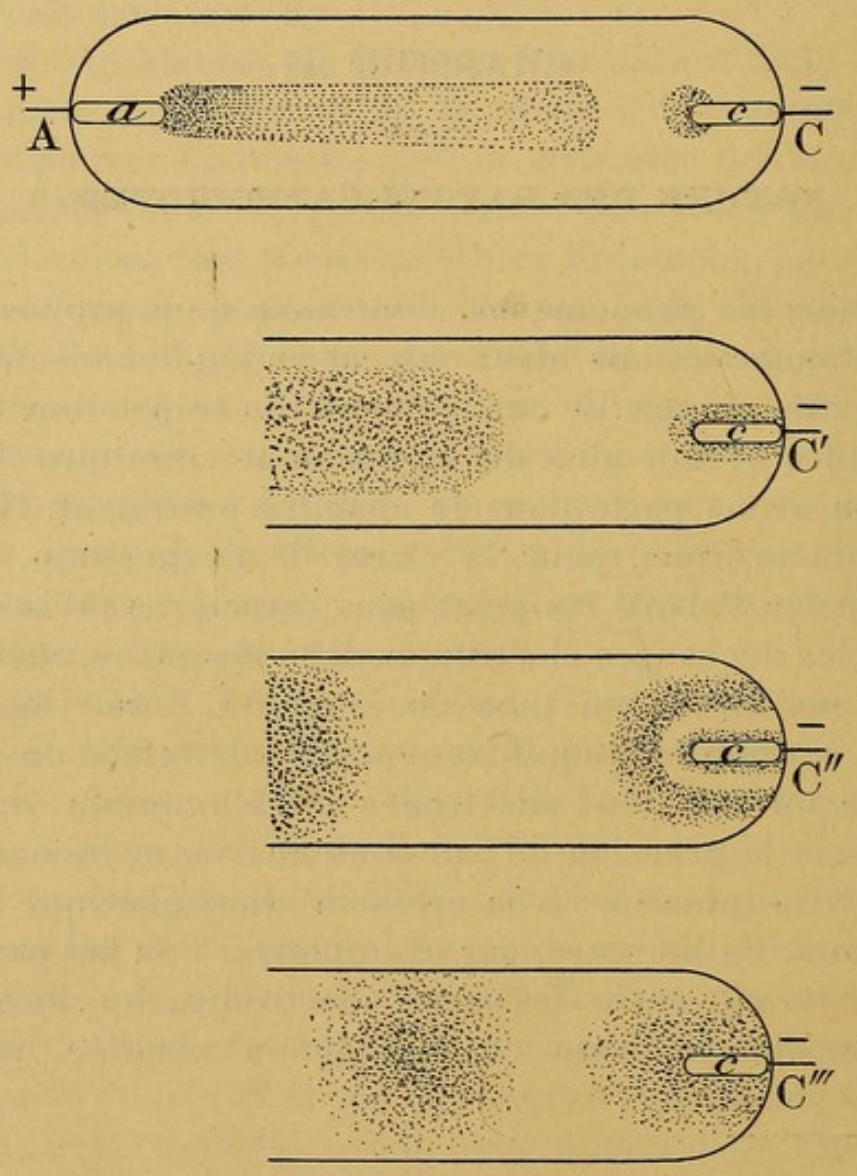

Fig. 8

ties : une colonne lumineuse positive, sorte d'étincelle rosée, tronquée, à contours diffus, qui part de l'anode, va vers la cathode et s'arrête à une certaine distance de cette dernière, et la lumière négative,

de couleur violacée, contiguë à la cathode. Entre ces deux espaces illuminés se trouve un intervalle sombre appelé « *espace obscur de Faraday* ».

Lorsque l'on diminue encore la pression dans le tube, ces apparences lumineuses changent. En ce qui concerne la colonne positive, à mesure que la pression décroît, elle perd de plus en plus en étendue et en intensité lumineuse, et présente souvent un aspect stratifié. Mais occupons-nous surtout de la lueur négative. Celle-ci commence d'abord à s'étendre sur toute la cathode (comme en C′, fig. 8), alors qu'au commencement elle n'en occupait que l'extrémité ; et, avec des raréfactions de plus en plus intenses, elle arrive à s'étendre à des distances de plus en plus grandes en se séparant en même temps de l'électrode (comme en C″, fig. 8). Pendant ce temps, une nouvelle couche lumineuse se forme autour de la cathode : c'est le *premier strate négatif*, adhérent à la cathode et séparé du *second* strate *négatif* (qui primitivement occupait la position du premier) par un intervalle relativement obscur appelé *espace obscur de la cathode* (qu'il ne faut pas confondre avec l'espace obscur de Faraday).

Si l'on pousse le vide plus loin, ces deux couches lumineuses négatives s'étendent de plus en plus, deviennent moins lumineuses et leurs contours perdent en netteté (C‴, fig. 8). Enfin, si le vide atteint un millième de millimètre de mercure, toute luminosité du gaz disparaît presque complètement. Mais avant d'arriver à ce point, un nouveau phénomène se manifeste. Les parois du tube deviennent lumineuses, d'abord autour, ensuite en face de la cathode, en répandant une vive lumière, généralement verte, due à une sorte de *phosphorescence*, ou mieux peut-

être, de *fluorescence*, (cette dernière dénomination étant attribuée à l'émission de lumière par certains corps, laquelle, comme pour le spath fluor, disparaît en même temps que la cause qui la produisait).

L'origine de ce phénomène est dans la cathode ; il est facile de s'en convaincre en interposant un écran entre cette dernière et la paroi opposée du tube: on obtient immédiatement une ombre très nette dont le contour varie avec celui de l'écran, comme si la fluorescence était excitée par des rayons invisibles partant de la cathode.

C'est à ces rayons émis par la cathode que l'on a donné le nom de *rayons cathodiques*. Nous allons nous occuper de certaines de leurs propriétés.

Ces rayons se propagent en ligne droite et partent de la cathode en se dirigeant perpendiculairement à la surface de cette dernière : si la cathode a la forme d'un miroir concave, les rayons cathodiques concourront en un foyer unique situé au centre de courbure du miroir constituant la cathode. Ils ont été utilisés sous cette forme par W. Crookes, qui est arrivé à dégager leurs singulières propriétés au moyen d'appareils ingénieusement combinés.

Les principales propriétés des rayons cathodiques sont les suivantes :

Ils excitent la fluorescence du verre (ainsi que nous venons de le voir) et de beaucoup d'autres corps, que la lumière peut également rendre phosphorescents.

Les rayons cathodiques échauffent les corps qu'ils frappent et tendent à les déplacer. Cette dernière action, purement mécanique, pourrait d'ailleurs n'être qu'une simple conséquence de l'effet précédent.

Enfin les corps frappés par les rayons cathodi-

ques deviennent la source de nouveaux rayons : *les rayons X*, auxquels est attaché le nom de Röntgen.

Pour expliquer tous ces phénomènes, Crookes émit l'hypothèse de la *matière radiante* (1).

Déjà, vers la fin de 1816, le célèbre Faraday (2) avait indiqué la possibilité d'un quatrième état de la matière comme une conséquence d'un changement hypothétique « qui surpasse l'évaporation d'autant que cette dernière surpasse la fluidité » ; et il rendait sa pensée encore plus claire en disant qu'il « attendait avec la plus vive impatience la découverte d'un nouvel état des éléments chimiques ». Il ajoutait ensuite, et cela a un intérêt spécial pour la théorie qui nous occupe, que « la décomposition des métaux, leur recombinaison, la réalisation de l'idée jadis absurde de la transmutation » sont des problèmes que la chimie est appelée à résoudre.

Lorsque la décharge a lieu dans un gaz très raréfié, des particules matérielles très petites et électrisées négativement seraient, suivant Crookes, violemment projetées par la cathode ; ces particules formant un quatrième état de la matière, successif à l'état gazeux, produiraient par leurs chocs les effets constatés, et constitueraient par leurs trajectoires les rayons cathodiques (3).

---

(1) Le nom *d'état radiant*, proposé par Crookes pour désigner son quatrième état de la matière, avait déjà été employé par Faraday (voir Bence Jones, *Vie et lettres de Faraday*). [E. N.]

(2) D'après une conférence faite par Sir W. Crookes au Congrès de Chimie tenu à Berlin en Juin 1903.

(3) La caractéristique de cette « *matière radiante* » est l'indépendance absolue des molécules qui sont, dans cet état, devenues capables de parcourir de longs chemins sans dévier de la ligne droite. C'est en précisant cette hypothèse, pour la mettre en accord avec la théorie cinétique des gaz, que M. W. Crookes admet que *l'espace obscur autour de la cathode* mesure le chemin moyen des particules, c'est-à-dire le chemin qu'elles peuvent parcourir sans rencontrer d'obstacle. Quant à

On supposa ensuite que ces particules étaient les atomes mêmes du gaz résiduel qui, vu son extrême raréfaction, présente ces nouvelles propriétés, que le radiomètre de Crookes met en évidence par la rotation de son petit moulinet.

D'autres savants, parmi lesquels Hertz, préféraient considérer les rayons cathodiques comme un phénomène ondulatoire analogue à la lumière, ayant son origine dans la surface de la cathode et son siège dans l'éther.

Mais cette opinion a dû être rejetée devant les résultats des expériences ultérieures.

Pendant que différents physiciens, entre autres J.-J. Thomson (1), auquel la théorie des électrons doit tant, et Q. Majorana (2), reconnaissaient que la vitesse des rayons cathodiques est notablement inférieure à celle de la lumière, M. J. Perrin (3) mettait en évidence le transport de l'électricité négative effectué par ces rayons, transport que P. Lenard (4) a pu constater même dans le cas où ces rayons avaient déjà traversé une lame métallique mince.

L'expérience de Perrin peut être répétée au

---

la lueur qui entoure l'espace cathodique obscur (dans les tubes dont le vide n'est pas poussé jusqu'au bout), ainsi que la fluorescence des parois et les éffets mécaniques et calorifiques observés, ce sont des conséquences du *bombardement moléculaire*, c'est-à-dire qu'ils résultent du choc des particules contre les molécules du gaz environnant ou contre les parois ou les obstacles de diverse nature que ces particules rencontrent. (Voir plus loin, page 44.) [E. N.]

(1) J.-J. Thomson. — *Phil. Mag.*, t. XXXVIII, p. 358, (1894).

(2) Q. Majorana. — *Il Nuovo Cimento* [IV], t. VI, p. 336 (1897).

(3) J. Perrin. — *Comptes rendus*, t. CXXI, p. 1130, (1895).

(4) P. Lenard. — *Wied. Ann.*, t. LXIV, p. 279 (1898).

— On ne saurait oublier ici, en dehors des noms de J.-J. Thomson P. Lenard et Q. Majorana, le nom de W. Wien (*Die electrostatischen Eigenschaften der Kathodenstrahlen*. Verh. der phys. Gesell., in Berlin, t. XVI, p. 165, 1897). [E. N.]

moyen d'un tube à décharge analogue à celui représenté par la fig. 9.

La cathode C est un disque en aluminium et l'anode E A B D a la forme d'une boîte cylindrique dont les deux bases sont percées, en leur centre, d'une ouverture circulaire. Une de ces ouvertures donne passage à un conducteur F, qui peut être relié à un électroscope ; la boîte A B D E est mise au sol. La conducteur F a une forme analogue à celle de l'anode ; une de ses bases est percée en son cen-

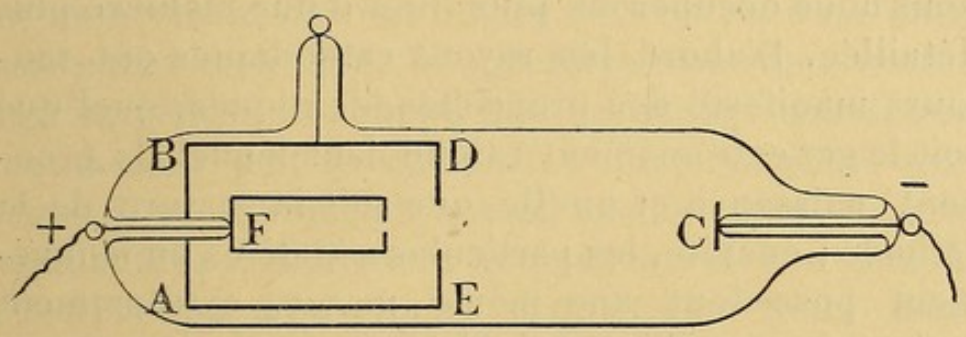

Fig. 9

tre d'une ouverture, qui est située en face de l'ouverture pratiquée dans la base D E de l'anode.

En faisant passer le courant, on recueille sur le conducteur F une charge négative, qui ne peut être due qu'au transport effectué par les rayons cathodiques. Il suffit d'ailleurs d'approcher du faisceau cathodique un aimant (celui-ci a pour effet de dévier ce faisceau, ainsi que nous le verrons plus loin) pour que les rayons ne puissent plus pénétrer dans le cylindre anodique et qu'ils suivent un chemin différent rendu visible par la tache lumineuse que ces rayons laissent sur la paroi D E, si on a eu la précaution de la recouvrir d'un corps phosphorescent. Dans ces conditions, l'électromètre, qui est en relation avec le conducteur F, n'accuse plus de charge de ce dernier.

La constatation de ces faits apporte un solide appui à la théorie de Crookes. Enfin, d'innombrables recherches effectuées dans ces dernières années ont conduit à modifier un peu et à mieux préciser l'hypothèse primitive, en admettant que les particules, dont le mouvement rapide constitue les rayons cathodiques, ne sont autres que les électrons négatifs eux-mêmes. Cette opinion, aujourd'hui adoptée par tout le monde, repose principalement sur les faits suivants, constatés avec beaucoup de précision, et dont nous nous occuperons plus loin d'une manière plus détaillée. D'abord les rayons cathodiques ont toujours manifesté des propriétés identiques, quel que soit le gaz extrêmement raréfié dans lequel ils prennent naissance et quelle que soit la nature de la cathode ; ensuite, les particules négatives en mouvement possèdent une même masse, extrêmement petite, plus de mille fois inférieure à celle d'un atome d'hydrogène. C'est là, nous l'avons déjà dit, le résultat de l'étude de certains phénomènes, en particulier, du phénomène de Zeeman.

Les rayons cathodiques peuvent en outre être produits sans qu'on soit obligé de recourir à la décharge électrique. Ainsi, par exemple, un corps exposé à l'action des rayons lumineux, ou mieux ultraviolets, émet des électrons. Si le gaz ambiant n'est pas extrêmement raréfié, ces électrons s'unissent aux atomes neutres pour former des ions négatifs ; mais si le gaz est supprimé [1], les électrons restent libres et s'éloignent du corps en formant des véritables rayons cathodiques doués généralement d'une vitesse moindre que celle qu'ils possèdent dans

---

[1] P. Lenard. — *Drudes Ann.*, t. II, p. 389 (1900).

les tubes à décharge, et d'autant plus petite que le potentiel du corps négatif éclairé est plus bas.

Dans le cas des rayons cathodiques, on n'a pas déterminé isolément la masse des électrons, mais seulement le rapport de leur charge électrique à leur masse. Cette détermination est faite d'après les effets produits sur les rayons cathodiques par les forces magnétiques, effets qui sont en harmonie avec les hypothèses admises.

Il est clair, en effet, que les particules négatives en mouvement doivent dévier de leur chemin, ordinairement rectiligne, si une force électrique vient à agir sur elles ; et comme une particule électrisée en mouvement doit se comporter d'une manière analogue à un courant ou mieux, à un élément de courant, cette particule sera donc déviée de son chemin sous l'action d'un champ magnétique. Nous nous occuperons d'ailleurs un peu plus loin de ces phénomènes ainsi que de leurs mesures relatives.

CHAPITRE IV

LES IONS DANS LES GAZ ET DANS LES SOLIDES

Nous avons vu que dans les électrolytes, les électrons étaient unis aux atomes neutres pour former des ions libres et que le mouvement de ces derniers constituait le courant électrique. On admet aujourd'hui que la même chose se passe dans les gaz ; c'est-à-dire que s'ils possèdent une conductibilité électrique, elle est due à la présence des ions et à leur mouvement sous l'action des forces électriques. L'hypothèse de *l'ionisation* des gaz, qui pendant longtemps ne fût soutenue que par peu de physiciens, est à présent généralement admise à la suite des nombreuses expériences instituées dans ces dernières années.

On admet donc qu'un gaz contient des ions libres ; ces ions existant ordinairement en très faible quantité, la conductibilité qui en résulte est très faible. Mais dans certaines circonstances, grâce à une énergie externe appropriée, le gaz se trouve *ionisé*, c'est-à-dire qu'un grand nombre de ses atomes se trouve divisés en ions positifs et en électrons négatifs. Ces derniers, si le gaz n'est pas trés raréfié, donnent naissance, en s'unissant aux atomes neutres, à des ions négatifs. Certains faits semblent, en outre, indiquer que des atomes ou molécules neutres peu-

vent s'unir aux ions, de manière à former des groupes qui, tout en possédant la charge caractéristique des ions, possèdent néanmoins une masse beaucoup plus grande que celle qui peut appartenir à un simple ion.

Cette hypothèse, que la conductibilité électrique des gaz est due à la présence de particules électrisées libres de se mouvoir parmi ses molécules, explique de la manière la plus naturelle les faits connus et en particulier ceux qui suivent.

Si l'on fait passer un gaz ionisé à travers des ouvertures étroites, à travers un tampon de coton de verre, par exemple, ou à travers des tubes métalliques longs et très étroits, ou, encore, si on le fait barboter dans un liquide conducteur [1] (ne contenant pas de substances radioactives), ce gaz perd sa conductibilité. On obtient le même résultat en dirigeant le courant gazeux entre deux conducteurs chargés d'électricité de noms contraires, de manière qu'il fasse office de conducteur de courant. Dans le premier cas, le fait s'explique en invoquant l'attraction exercée sur les ions par les corps auprès desquels ils passent ; dans le second cas, les deux conducteurs appellent à leur surface les ions ayant une charge opposée à la leur, de sorte que le gaz en est complètement débarrassé.

La manière dont se comporte un gaz ionisé quand il transmet un courant électrique est également en parfait accord avec l'hypothèse admise. Supposons que nous ayons, par exemple, deux disques métalliques parallèles, dont l'un communique avec le pôle isolé d'une pile et dont l'autre soit en relation avec un électromètre ; ionisons ensuite l'air compris

(1) J.-J. Thomson et E. Rutherford. — *Phil. Mag.*, t. XLII p. 392 (1896).

entre ces deux disques en y faisant passer un pinceau de rayons de Röntgen, par exemple, et faisons varier en même temps le potentiel fourni par la pile : l'on reconnaît immédiatement que la conductibilité du gaz ne suit plus la loi d'Ohm, qui est vraie dans le cas de courants électriques constants, et en vertu de laquelle l'intensité d'un courant traversant un conducteur croît proportionnellement à la différence de potentiel qui règne à ses extrémités. L'on reconnaît, en effet, que dans le cas de l'expérience citée, l'intensité du courant, mesurée par la charge acquise par le disque qui communique avec l'électromètre pendant un temps fixe et déterminé, croît moins vite que le potentiel. De plus, cette intensité finit par atteindre une valeur limite qui n'augmente plus si l'on continue à faire croître le potentiel de la pile. Comment interpréter cette valeur limite du courant, dite limite de *saturation* ? — C'est qu'à ce moment tous les ions produits, pendant un temps donné, par les rayons de Röntgen (ou par telle autre cause ionisatrice que l'on voudra employer) sont utilisés au transport du courant pendant ce même temps. Une augmentation du potentiel n'a, maintenant, plus d'effet, parce qu'il n'y a plus d'ions disponibles.

Enfin, un autre phénomène curieux, remarqué par M. A. Righi [1], confirmé et interprété par MM. J.-J. Thomson et E. Rutherford, trouve également une explication très naturelle dans la théorie admise. Voici de quoi il s'agit. Reprenons les disques métalliques précédents et faisons varier la distance qui les sépare ; on constate facilement, que

[1] A. Righi. — *Mem. della R. Acc. di Bologna* [V], t. VI, p. 252, (1896).

l'intensité du courant qui traverse l'air ionisé compris entre les deux disques ne varie pas dans le sens attendu : l'intensité de ce courant *croît* (entre certaines limites) avec la distance des deux disques, *au lieu de décroître*. Or, cela s'explique aisément dans la nouvelle théorie, car en augmentant la distance des disques, on augmente en même temps le volume de la masse d'air qui prend part au phénomène ; le nombre d'ions augmente donc en même temps et, par suite, il en est de même du courant de saturation qui est constitué par leur mouvement.

Dans les gaz, les ions se meuvent au milieu des molécules matérielles, donnant naissance à de fréquentes collisions avec ces dernières. De nouveaux ions peuvent être formés par suite de la scission des molécules neutres, et des ions de signes opposés peuvent, en se recombinant, reconstituer des molécules. Ce dernier fait se produit continuellement, et il est la cause que le nombre d'ions formés, sous une influence ionisatrice, ne peut dépasser une certaine limite.

Si l'ionisation ne se fait qu'en un point de la masse du gaz, les ions qu'elle engendre ne se diffusent pas moins dans tout l'espace occupé par le gaz. A la pression ordinaire, la vitesse de diffusion est généralement très petite, et cela à cause des collisions (chocs), qui sont très fréquentes ; mais si l'on fait intervenir un champ électrique, cette vitesse de diffusion devient grande et d'après les premières mesures effectuées dans ce but [1], son ordre de grandeur serait égal à plusieurs dizaines de mètres par seconde.

---

[1] A. Righi. — *Atti del R. Instit. Veneto* [VI], t. VII (1889).

Les rayons ultraviolets, les rayons cathodiques, les rayons de Röntgen, les rayons émis par les corps radioactifs, l'échauffement jusqu'à une température assez élevée, sont autant d'agents capables de produire l'ionisation. Cette ionisation est plus ou moins intense, suivant les cas, et elle est toujours limitée, ainsi que nous venons de le dire, par de continuelles reconstitutions d'atomes neutres. Mais il y a une autre cause d'ionisation, à laquelle se réduisent en réalité quelques-unes des causes précédemment énumérées : c'est le choc des ions, ainsi que celui des électrons, (dont quelques-uns existent probablement, ou tout au moins d'une façon transitoire, à l'état libre même dans un gaz à la pression ordinaire) avec les atomes et les molécules. Lorsqu'un ion possédera une vitesse suffisamment grande, il pourra fournir l'énergie nécessaire à la transformation d'un atome matériel en ion positif et électron négatif, et ensuite d'une molécule en deux ions de signes opposés.

Passons maintenant rapidement en revue ces divers modes d'ionisation d'un gaz.

Les radiations lumineuses et plus spécialement les radiations ultraviolettes, peuvent ioniser les gaz de deux manières différentes. Si elles frappent un corps solide ou liquide, elles y déterminent une émission d'électrons négatifs, qui a pour résultat la décharge rapide du corps, si ce dernier était préalablement électrisé négativement, et l'apparition d'une charge positive sur le même corps ainsi que l'a démontré M. A. Righi [1]. Ce sont les métaux que l'on emploie habituellement pour faire l'expérience, et cela parce qu'avec les liquides, l'effet à observer

---

[1] A. Righi. — *Rend. della R. Acc. dei Lincei* (4 mars 1888).

est assez faible, et que les diélectriques se prêtent encore moins à des déterminations quantitatives; les radiations actives employées sont les radiations invisibles ultraviolettes émises par l'arc électrique ou par l'étincelle électrique. Ajoutons qu'avec certains métaux, les métaux alcalins et le zinc amalgamé par exemple, les rayons visibles donnent un effet suffisamment marqué.

Cela étant, si le champ créé par la charge négative préalable du corps est suffisamment intense, les électrons négatifs émis par ce dernier peuvent acquérir une vitesse suffisante pour pouvoir ioniser, par suite de leurs chocs, les atomes matériels neutres.

Les radiations ultraviolettes les plus réfrangibles, émises par l'étincelle électrique, peuvent en outre provoquer *directement* l'ionisation des gaz qu'elles traversent, ainsi que l'a démontré M. P. Lenard [1], en faisant agir sur des corps électrisés les radiations émises par l'étincelle éclatant entre des électrodes d'aluminium.

Ces corps se déchargent à peu près avec la même vitesse, qu'ils soient chargés d'électricité positive ou d'électricité négative, et quels que soient leur nature et l'état de leur surface. Cela ne peut évidemment pas être attribué à une action des radiations ultraviolettes sur les corps chargés, mais bien à une action de ces dernières sur la masse d'air traversée, les radiations en question produisant l'ionisation dont on constate les effets. Une expérience, qui peut d'ailleurs être répétée au moyen d'autres agents ionisateurs, confirme cette manière de voir. Elle consiste à faire déplacer de l'air ionisé de l'endroit où il est sou-

---

[1] P. Lenard. — *Drudes Ann.*, t. I, p. 486 (1900).

mis à l'ionisation vers un autre endroit, où se trouvent des corps électrisés, qu'il déchargera en vertu de la conductibilité qu'il a acquise par suite de l'ionisation et qu'il conserve pendant un certain temps. En interceptant les radiations ionisatrices, l'effet cesse de se produire.

Il semble que ce sont les radiations ultraviolettes les plus rapides qui produisent d'une manière sensible l'ionisation directe des gaz ; et, de fait, les expériences qu'on vient de décrire ne réussissent que si le chemin parcouru dans l'air par les radiations ne dépasse pas quelques centimètres ; or les radiations ultraviolettes sont précisément rapidement absorbées par l'air à la pression ordinaire.

Les rayons cathodiques qui ne sont, ainsi que nous l'avons déjà vu, que des électrons négatifs en mouvement, ionisent également les gaz ; nous y reviendrons dans quelques instants avec un peu plus de détails.

Quant aux rayons de Röntgen, qui sont vraisemblablement la manifestation d'ondes éthérielles engendrées par de brusques variations de la vitesse des électrons, l'ionisation qu'ils produisent semble due à l'impulsion électrique instantanée communiquée aux électrons des atomes gazeux.

Enfin, l'élévation de la température, qui équivaut à une augmentation de la vitesse des atomes et, vraisemblablement, de la vitesse avec laquelle vibrent les électrons négatifs, tend naturellement à libérer ces derniers de leur lien avec la partie positive de l'atome. Un fil métallique porté au rouge ionise le gaz qui le touche, et les gaz de la flamme se montrent toujours fortement ionisés.

Pour que les molécules d'un gaz soient ionisées par suite du choc des ions qu'il contient, il est généralement nécessaire de soumettre le gaz à l'action de forces électriques intenses. Dans un champ trop faible, les ions, tout en obéissant à la force électrique, ne peuvent acquérir, dans l'intervalle qui sépare deux chocs consécutifs, une vitesse suffisante, et l'effet des chocs se réduit alors à maintenir la vitesse toujours faible, puisqu'une partie de l'énergie du mouvement des ions est communiquée aux molécules frappées. Dans ces conditions, les trajectoires décrites par les ions ne peuvent différer que très peu des lignes de force électrique, ou, en d'autres termes, les ions se meuvent continuellement à peu près dans la direction même de la force qui les sollicite. Les phénomènes dits d'ombres électriques et d'autres phénomènes analogues [1] en sont la conséquence immédiate.

Mais lorsque l'intensité du champ électrique agissant sur le gaz est suffisamment forte, l'ionisation par suite de choc a lieu, et c'est ce fait, qui constitue la base d'une explication satisfaisante des phénomènes complexes et variés de la décharge électrique.

Nous ne pouvons pas ici insister davantage sur ces faits, mais en vue de ce qui suit, il est utile de rappeler, à titre d'exemple, l'explication qu'on donne de la formation des deux couches de lueur négative et de l'espace obscur qui les sépare, dans le cas d'une décharge dans un gaz fortement raréfié.

Le phénomène est amorcé par le petit nombre d'ions et d'électrons existant préalablement dans le

---

(1) A. Righi. — *Il moto dei ioni*, etc. ; Attualità Scientifiche I ; Zanichelli, editore, Bologna 1903).

gaz, ou peut-être encore par des électrons négatifs émis par la cathode. Ces électrons se meuvent d'un mouvement accéléré et acquièrent rapidement une vitesse suffisante pour devenir capables d'ioniser par choc, à quelque distance de la cathode, les molécules du gaz, donnant ainsi naissance au deuxième strate négatif. Ce strate est donc une région du gaz où se produit l'ionisation. Les ions positifs ainsi créés seront entraînés par la force électrique vers la cathode et ils possèderont, à proximité de cette dernière, la vitesse requise pour ioniser les molécules gazeuses : d'où la formation du premier strate de lueur négative.

Les électrons produits dans cette région se meuvent en s'éloignant de la cathode, de sorte que les deux régions d'ionisation fournissent l'une à l'autre les ions et les électrons nécessaires. L'espace obscur de la cathode n'est donc autre que l'espace parcouru par les électrons constituant les rayons cathodiques, et surtout par les ions positifs, qui se meuvent vers la cathode, avant qu'ils aient acquis la vitesse nécessaire pour produire l'ionisation.

Abandonnons maintenant les électrons négatifs qui sont arrivés jusqu'au premier strate négatif et occupons-nous uniquement des ions positifs qui arrivent sur la cathode. Une partie de ces derniers est naturellement neutralisée par des électrons négatifs, mais les ions restants peuvent, par suite de leur vitesse et par suite des différentes directions qu'ils peuvent suivre à la suite des chocs, contourner la cathode et même la traverser, si cette dernière est pourvue d'ouvertures, comme dans le cas d'une cathode constituée par une toile métallique. Les ions positifs constitueront alors au-delà de cette cathode des

rayons positifs ou *anodiques* analogues au rayons cathodiques et auxquels on donne fréquemment le nom de *rayons-canaux* (les *kanalstrahlen* de Goldstein).

Ces rayons positifs sont déviés par un champ électrique ou magnétique, mais cette déviation est de sens contraire à celle éprouvée par les rayons cathodiques dans les mêmes circonstances ; on en déduit que ces rayons sont véritablement constitués par des particules en mouvement électrisées positivement. La déviation observée est, toutes choses égales d'ailleurs, beaucoup plus faible pour les rayons positifs que pour les rayons cathodiques ; ce qui est naturel, étant donné que les particules positives en mouvement ne possèdent pas une masse extrêmement petite, comme dans le cas des rayons cathodiques, mais une masse de grandeur comparable à celle des atomes ou des ions électrolytiques. On a donc ici affaire à des ions et non pas à des électrons positifs, et même probablement à des groupes matériels de masse plus grande.

En admettant que la conductibilité électrique est un phénomène de transport, tant dans les gaz que dans les liquides, l'hypothèse analogue concernant les conducteurs solides, déjà énoncée dans le chapitre I devient de plus en plus naturelle ; et puisqu'il semble que seuls les électrons négatifs et non ceux positifs, peuvent exister isolément, on en déduit que *le courant électrique dans un conducteur consiste* (du moins principalement) *dans le mouvement des électrons négatifs*. Les métaux étant perméables aux rayons cathodiques, il s'ensuit qu'ils n'opposent pas un obstacle insurmontable au mouvement des électrons. On peut ajouter, sans toutefois entrer dans les détails

que cette manière d'envisager le courant permet de rendre compte des divers faits connus, comme par exemple la proportionalité entre les conductibilités électrique et calorifique des différents corps, et d'expliquer différents phénomènes, comme par exemple les propriétés optiques des métaux. Ici encore la théorie des électrons, non seulement ne rencontre pas de contradictions, mais elle se montre en outre apte à fournir une représentation simple des phénomènes.

CHAPITRE V

LA RADIOACTIVITÉ (1)

La découverte des rayons appelés rayons X, que le professeur W. Röntgen fit connaître vers le commencement de 1896, suggéra l'idée de chercher s'il n'y avait pas d'autres radiations capables d'agir sur la plaque photographique et de traverser les corps opaques. Des effets de ce genre furent décrits par M. G. Le Bon ; mais nous n'en parlerons pas ici, puisqu'il a été reconnu que ces effets, attribués par cet expérimentateur à une nouvelle catégorie de radiations appelée par lui *lumière noire*, proviennent, du moins le plus souvent, de causes n'ayant pas de relations immédiates avec le sujet que nous voulons traiter ici.

Certaines expériences de M. Ch. Henry (2), faites avec du sulfure de zinc phosphorescent, de M. G.-H. Niewenglowski (3), avec du sulfure de calcium et de M. H. Becquerel (4), avec du sulfate double

(1) Nous croyons de notre devoir de recommander aux lecteurs désireux d'aprofondir cette nouvelle et féconde branche de la physique, les deux remarquables ouvrages suivants :

E. Rutherford, *Radio-activity* (vol. in-8° de 400 pages. Cambridge University Press, 7904).

Fréd. Soddy, *Radio-activity* (vol. in-8 de 214 pages. The Electrician, publishing C°. Londres, 1904). [E. N.]

(2) Ch. Henry. — *Comptes rendus*, t. CXXII, p. 312 (1896)

(3) G. H. Niewenglowski. — *Comptes rendus*, t. CXXII, p. 385 (1896).

(4) H. Becquerel, *Comptes rendus*, t. CXXII, p. 420 (1896).

d'uranium et de potassium, sont, au contraire, apparentées avec la radioactivité : il résulte en effet, de ces expériences, que les corps précédents émettent, lorsqu'on excite leur phosphorescence au moyen des rayons X, des rayons capables d'agir sur une plaque photographique après avoir traversé des corps opaques.

En instituant ces expériences, M. H. Becquerel visait un but spécial. On savait déjà que l'origine des rayons X était sur la paroi située en face de la cathode, cette dernière étant frappée par les rayons cathodiques qui la rendent lumineuse ; il semblait donc naturel de supposer que la phosphorescence et l'émission des rayons X fussent des phénomènes connexes ; mais les expériences ultérieures démontrèrent que cette hypothèse n'était pas soutenable. M. H. Becquerel voulait donc voir si les corps rendus phosphorescents par la lumière du jour et non plus par les rayons cathodiques, émettaient aussi des rayons X. Son premier dispositif expérimental consistait à poser sur une plaque photographique, entourée d'une enveloppe opaque, différents corps et d'exposer le tout au soleil. Après quelques insuccès il obtint un effet certain en employant le sulfate double d'uranium et de potassium en lamelles cristallines : en développant la plaque photographique, il vit l'image de la lame cristalline et l'ombre d'une pièce d'argent, qui avait été interposée entre la plaque photographique et la lamelle rendue phosphorescente. Il semblait donc que le phénomène qu'on cherchait avait réellement lieu. Cependant M. H. Becquerel pût obtenir le même phénomène avec l'éclairement très faible d'un jour nuageux ; cela mettait en doute que le phénomène dépendit de

l'action le la lumière. Et M. Becquerel vérifia en effet, bientôt après [1], que le sel d'uranium utilisé émettait continuellement et spontanément des rayons capables de traverser les corps opaques et d'agir sur la plaque photographique, sans qu'il fût préalablement exposé aux radiations lumineuses.

Des recherches successives [2] démontrèrent ensuite, que les rayons émis par le sel d'uranium partagent avec les rayons X, non seulement la propriété de traverser des corps opaques, d'agir sur la plaque photographique, de rendre lumineux les corps phosphorescents et, ainsi qu'on le constata dans la suite, les propriétés négatives de ne pas être réfléchis, ni réfractés, ni polarisés, mais encore une autre propriété, qui fut reconnue pour les rayons X peu de temps après leur découverte [3], à savoir, celle d'ioniser les gaz qu'ils traversent. D'où une méthode d'étude des rayons Becquerel beaucoup plus rapide que la méthode photographique, et qui consiste à mesurer la vitesse avec laquelle se décharge un corps électrisé, lorsque le gaz qui l'entoure est soumis à l'action de ces rayons.

On peut utiliser dans ce but un électromètre quelconque en relation avec un disque métallique disposé parallèlement à un autre disque semblable au précédent, et opérer de deux manières différentes. Ou bien l'on met le second disque en communication avec le sol, et l'on étudie alors au moyen de l'élec-

---

(1) H. Becquerel. — *Comptes rendus*, t. CXXII, p. 301 (1896).

(2) H. Becquerel. — *Comptes rendus*, t. CXXII, p. 359 (1896).

(3) A. Righi. — *Rendi. della R. Acc. di Bologna*, 9 février (1896). Le même phénomène fut observé simultanément par divers autres physiciens. Entre autres par Benoist et Hurmuzescu, *Comptes rendus*, t. CXXII, p. 235 (1896) ; Dufour, *Arch. des Sc. phys. et natur.*, 4e sér., t. I, p. 111 (1896). [E. N.]

tromètre la vitesse avec laquelle diminue une charge électrique qu'on a communiquée au premier disque, quand l'air compris entre les deux disques est ionisé par le corps radioactif, ou bien l'on communique une charge électrique au second disque et l'on observe dans ce cas la vitesse de déviation de l'électromètre. Avec des corps très actifs, le galvanomètre peut remplacer l'électromètre. Mais lorsqu'il s'agit de corps faiblement radioactifs, on donne la préférence à l'électroscope à feuilles d'or, ou mieux à un instrument à feuille d'or unique, constitué simplement par une tige métallique A B (fig. 10)

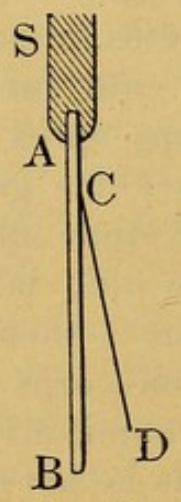

Fig. 10

à l'extrémité supérieure de laquelle est fixée une feuille d'or ou d'aluminium extrêmement mince C D. Pour rendre sûr l'isolement de la tige A B, cette dernière est fixée dans un bâton de soufre S. La capacité électrique du système conducteur A B C D est très petite ; il s'ensuit donc que la variation de déviation la feuille C D n'est pas trop lente. Si l'on observe les déviations au moyen d'un microscope muni d'un micromètre oculaire, notre électroscope devient électromètre. On peut, en effet, au moyen d'une

batterie de petits accumulateurs, étalonner l'appareil, c'est-à-dire trouver préalablement le potentiel correspondant à chaque division de l'échelle.

Un électromètre légèrement différent du précédent très utile pour l'étude des substances radioactives, a été construit par M. A. Righi. L'isolateur de soufre, ou de quartz fondu, est très fin et est fixé avec du mastic ou de la gutta-percha au fond d'une minuscule capsule métallique reliée à la tige A B (fig. 11). Ce mode d'attache évite, ou du moins atté-

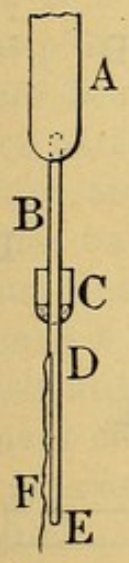

Fig. 11

Fig. 12

nue la diffusion de la charge électrique de la tige sur la surface de l'isolateur. En outre M. Righi, reprenant une de ses anciennes dispositions remplace l'échelle oculaire par un dispositif plus facile à construire : l'on projette au moyen d'une lentille convergente achromatique l'image d'une échelle ordinaire au millimètre, se trouvant à quelques mètres de l'électroscope, dans le plan où se meut la feuille métallique de l'électromètre.

On voit alors dans le champ du microscope en même temps la feuille et l'échelle (fig. 12).

Dans un des électromètres construit par M. Righi, les dimensions de la tige A B et de la feuille d'or ne dépassent pas un quart des dimensions de la figure 11. Cet instrument est particulièrement commode pour la démonstration de la radioactivité, car il suffit d'approcher un sel d'uranium, pour que les rayons émis par ce dernier pénétrant dans la

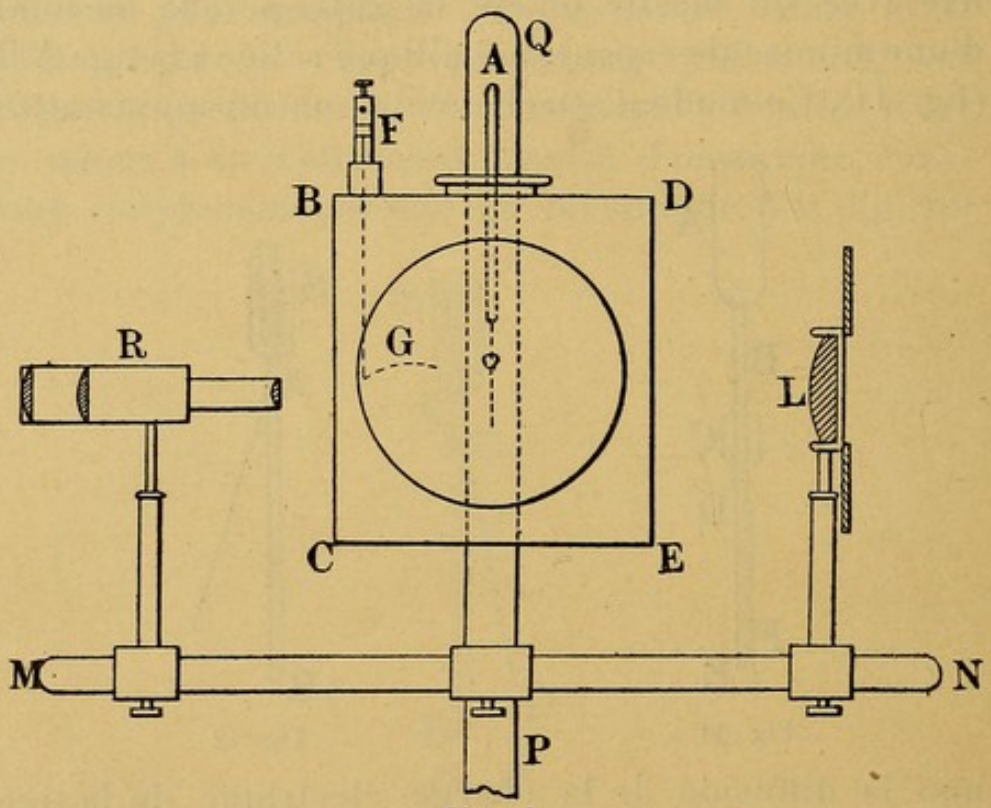

Fig. 13

boîte métallique qui abrite la feuille d'or à travers une très mince lame d'aluminium, fassent baisser à vue d'œil la feuille d'or préalablement électrisée.

En multipliant les expériences, on a ensuite constaté, que tous les composés de l'uranium sont radioactifs, c'est-à-dire qu'ils émettent des rayons de Becquerel et que l'intensité de leur rayonnement est proportionnelle à la quantité d'uranium qui y est contenue. Ceci démontre que la radioactivité est une

propriété de l'atome d'uranium, laquelle se conserve inaltérée, alors que l'atome même entre en combinaison avec des atomes d'autres espèces chimiques.

Peu de temps après, M. G. C. Schmidt [1], et Mme S. Curie [2], constatèrent, indépendamment l'un de l'autre, que le *thorium* est également radioactif et qu'il l'est à un degré peu différent de l'uranium.

Mais l'on aurait difficilement pu étudier d'une manière plus complète la radioactivité et déterminer la modalité et la cause immédiate probable de cet intéressant phénomène, ou l'on aurait, tout au moins, dû dépenser beaucoup de temps et il aurait fallu des expériences extrêmement précises, si l'on n'avait pas découvert certains corps, dont la radioactivité est des centaines ou des milliers de fois plus forte que celle de l'uranium.

Il fût donné à M. et Mme P. Curie de rencontrer certains échantillons de calcolite et de pechblende (spécialement celle que l'on retire à Joachimsthal) beaucoup plus actifs que l'uranium pur. Or, comme la radioactivité est, ainsi que nous venons de le voir, une propriété atomique, le phénomène ne pouvait donc être attribué à l'uranium contenu dans ces minerais, mais bien à la présence d'une autre substance inconnue plus active que l'uranium lui-même. Des méthodes physiques et chimiques ont permis de séparer de ces minéraux certains composés de bismuth ayant une radioactivité environ 400 fois plus forte que celle de l'uranium [3]. On donna le

---

(1) G. C. Schimidt. — *Wied. Ann.* t. LXV, p. 141; (1898).

(2) P. S. Curie. — *Comptes rendus*, t. CXXVI, p. 1101; (1897).

(3) P. Curie et Sklodowska-Curie. — *Comptes rendus*, t. CXXVII, p. 175; (1898).

nom de *polonium* à la substance inconnue contenue dans ces minéraux. On a, par la suite, constaté que la radioactivité de cette substance diminue lentement avec le temps. Plus tard, M. et Mme Curie et M. G. Bémont [1] parvinrent à extraire de la pechblende une petite quantité d'un corps très actif, analogue au point de vue chimique au baryum et associé à ce dernier dans presque toutes les réactions, auquel on donna le nom de *radium*. Un autre corps radioactif associé au thorium et ayant des propriétés chimiques analogues à celles appartenant à ce dernier fut découvert par M. A. Debierne [2] qui l'apela *actinium*.

D'autres substances notablement radioactives furent retirées de différents minéraux, et surtout de la pechblende, par différents autres expérimentateurs ; mais la nature de ces substances n'est pas encore bien connue. Ainsi, MM. J. Elster et H. Geitel [3] parvinrent à séparer un sulfate de plomb très radioactif, lequel semble néanmoins contenir simplement du baryum radifère. De même le plomb radioactif séparé par M. F. Giesel [4] n'est pas mieux caractérisé, pas plus que le plomb radioactif de MM. K. Hofmann et E. Strauss [5], qui ressemble, sous certains rapports, au polonium. Le plomb actif ou le *radio-plomb* de ces derniers auteurs mérite, toutefois, une mention spéciale à cause de la

---

(1) P. Curie, Sklodowska-Curie et G. Bemont. — *Comptes rendus*, t. CXXVII, p. 1215 ; (1898).

(2) A. Debierne. — *Comptes rendus*, t. CXXIX, p. 593 : (1899).

(3) J. Elster et H. Geitel. — *Wied. Ann.*, t. LXIX ; (1899).

(4) F. Giesel. — *Ber. deutsch. Chem. Gesell.*, t. XXXIII, p. 3569 ; (1901).

(5) K. Hofmann et E. Strauss. — *Ber. deutsch. Chem. Gesell.*, t. XXXIII, p. 3126, (1900) ; t. XXXIV. p. 3035, (1901) ; t. XXXV, p. 1453, (1903).

propriété suivante qu'il possède : le sulfate de plomb actif perd, dans certaines circonstances, une bonne partie de sa radioactivité pour la récupérer ensuite lentement ; cette récupération s'effectue en quelques minutes, si on expose cette substance aux chocs des rayons cathodiques.

Récemment MM. K. Hofmann et V. Wolf [1] ont séparé, en partie, la substance active contenue dans le plomb inactif et ont reconnu qu'elle diffère du polonium de Mme S. Curie par la constance de ses propriétés radioactives.

De même, le corps auquel M. W. Marckwald donna le nom de *radio-tellure* [2], ressemble, quant à ses propriétés, au polonium, avec cette différence que sa radioactivité ne semble pas diminuer avec le temps. La radio-tellure serait donc le corps auquel est due l'activité du bismuth extrait de la pechblende de Joachimsthal, et M. Marckwald le considère comme un nouveau corps appartenant à la famille du soufre et du tellure, car il se dépose sur des bâtons de bismuth ou d'antimoine introduits dans la dissolution acide de chlorure de bismuth actif. En partant de 850 grammes de ce sel, M. Marckwald obtint environ 0,6 gr. de substance très active.

Un bismuth actif très semblable à celui des autres expérimentateurs fut retiré par M. F. Giesel [3], qui en sépara ensuite un produit actif identique à celui de M. Marckwald. Enfin, un élément radioactif supposé nouveau fût séparé du thorium par M. C. Baskerville [4], qui lui donna le nom de *carolinium*.

---

(1) K. Hofmann et Wolf. — *Chem. Ber.*, t. XXXVI, p. 040 (1903).
(2) W. Marckwald. — *Phys. Zeitsch.*, t. IV, p. 51 ; (1902).
(3) F. Giesel. — *Chem. Ber.*, t. XXXVI, p. 728 (1903).
(4) C. Baskerville. — *J. Amer. Chem. Soc.*, t. XXIII, p. 761.

De ce qui précède, il se dégage donc qu'une grande incertitude règne encore sur la nature et l'existence distincte de la majeure partie des substances radioactives ; et cela au point que certaines personnes considèrent les effets attribués au polonium de Mme Curie comme dus à une radioactivité *induite*, c'est-à-dire, à un phénomène transitoire, dont on parlera plus loin ; de même, certains auteurs admettent une identité d'origine entre le thorium radioactif et l'actinium. La chimie des corps radioactifs n'est qu'à son début et l'existence du radium, comme élément distinct des autres (d'ailleurs, on connaît déjà le spectre qui le caractérise), semble seule certaine jusqu'à présent. Le radium n'a pas encore été obtenu à l'état libre, mais on en connaît néanmoins quelques sels. En particulier la faible quantité de substance radioactive que M. et Mme Curie parvinrent à retirer patiemment de plusieurs tonnes de résidus de pechblende, qui avait déjà servi pour l'extraction de l'uranium, est constitué par du *chlorure de radium*.

Ces résidus contiennent des composés de presque tous les métaux, parmi lesquels se trouvent le baryum, le bismuth et les métaux des terres rares. Des procédés chimiques trop longs pour être décrits ici, permettent de retirer séparément les groupes suivants : baryum et radium, bismuth et polonium, terres rares et l'actinium, après quoi il reste à séparer dans chacun de ces groupes le corps radioactif du composé auquel il est uni. Cette séparation, à laquelle Mme Curie consacra plusieurs années de travail, n'est donc jusqu'ici parfaitement réalisée que dans le cas du radium. Voici en quelques mots la méthode suivie par Mme Curie.

Le chlorure de baryum radifère, qu'on retire dans la proportion d'environ 8 kilogr. par tonne de résidus de pechblende, est dissous dans l'eau chaude de manière à former une solution saturée. Cette dernière laisse déposer, par refroidissement, des cristaux, que nous appellerons (A) pour simplifier le langage, pendant qu'en faisant évaporer séparément la solution restante l'on obtient un autre chlorure que nous appellerons (B). Le chlorure de radium étant un peu moins soluble que celui de baryum, il arrive que le chlorure (A) est plus riche en radium que le chlorure (B) : ce que l'on constate en examinant séparément les radioactivités des deux chlorures. On procède ensuite à une seconde opération tant sur le produit (A) que sur le produit (B), ce qui donne quatre portions diversement riches en radium qu'on réduit à trois en réunissant la partie la moins active retirée de (A) avec la partie plus active retirée de (B), ces deux portions ayant sensiblement le même degré de radioactivité. On continue pendant longtemps la même série d'opérations, et pour ne pas augmenter indéfiniment le nombre de portions distinctes, on a soin, ensuite, de ne plus tenir compte de celles dont la radioactivité est manifestement trop faible et de cesser le fractionnement de celles dont la radioactivité est très élevée. Il est utile aussi de se servir de l'eau mère des cristaux recueillie dans une opération pour faire dissoudre les cristaux obtenus dans l'opération suivante. Lorsque l'on a ainsi éliminé la majeure partie de la substance inactive, on continue le fractionnement mais en ayant soin d'éliminer avec moins de parcimonie les parties moins actives, En agissant ainsi, l'on perd un peu de radium mais la purification s'effectuera plus rapidement ;

il convient, dans ce but, d'aciduler de plus en plus le dissolvant avec de l'acide chlorydrique pur. On arrive ainsi finalement à isoler le chlorure de radium sensiblement pur, dans la proportion de 2 à 3 décigrammes par tonne de résidus employés. On prépare également aujourd'hui, à l'état de pureté, le *bromure* de radium.

Outre l'examen du degré croissant de radioactivité de la substance obtenue, l'examen spectroscopique peut également servir à en évaluer la pureté. Le radium possède, en effet, un spectre caractéristique, qui a été étudié par Demarçay [1]; l'examen spectrosco-

---

[1] Voici quelques détails au sujet du spectre du radium :

Demarçay étudia le spectre d'étincelle du radium et le photographia dans la région comprise entre $\lambda = 5{,}000$ et $\lambda = 3{,}500$ unités Angström. Voir à ce sujet les notes publiées dans les *Comptes rendus* de l'Académie des Sciences de Paris, en 1898, 1899 et 1900 (t. CXXXVII, p. 1218, 1898 ; t. CXXXIX, p. 716, 1899 ; t. CXXXI, p. 258, 1900).

Voici le tableau des longueurs d'ondes des raies caractéristiques et leurs intensités relatives :

	λ	INTENS.		λ	INTENS.
bleu	4826.3	10	violet	4600.3	3
	4726.9	5		4533.5	9
	4699.8	3		4436.1	8
	4692.1	7	ultra-violet	4340.6	12
	4683.0	14		3814.7	16
	4641.9	4		3649.6	12

Ces longueurs d'onde sont données en unités Angström ($\mu = 10$ unit. Angs.). Dans la partie visible du spectre, qui n'a pas été photographiée, il y a une seule raie à noter, la raie $\lambda = 5665$ qui est très faible par rapport à la raie 4826.3. Le spectre du radium a donc l'aspect général des spectres des métaux alcalins : raies fortes accompagnées de bandes nébuleuses. Il convient encore de citer ici les recherches spectroscopiques sur le radium de C. Runge (*Astrophys. Journal*, p. 1, 1900 ; *Drude's Ann.*, n° 10, p. 407, 1903 et de Exer et Haschek, *Sitz. Ak. Wiss. Wien*, 4 juillet 1901) ; ces recherches ont été faites sur des préparations de M. Giesel.

Le spectre de flamme montre deux raies larges et brillantes, non

pique du produit impur montre, en même temps que les raies caractéristiques du radium, les raies appartenant au spectre du baryum; mais à mesure que l'on purifie le produit, les raies du baryum s'affaiblissent graduellement et finissent par disparaître presque complètement.

Les principaux effets dus aux corps radioactifs une fois constatés, l'attention des physiciens se concentra sur l'étude directe des radiations émises par ces corps. Les radiations connues sont, ou du moins on admet qu'elles sont, de deux espèces; à savoir : ou dues à des ondes propagées par l'éther, ou dues au mouvement de particules electrisées. Appartiennent à la première espèce non seulement les rayons lumineux proprement dits, les rayons invisibles calorifiques et les rayons invisibles ultraviolets, mais encore les rayons de Röntgen. La seconde espèce comprend les rayons cathodiques, qui sont précisément considérés comme dûs au mouvement des électrons négatifs.

---

observées dans le spectre photographié par Demarçay. Il y a de plus une raie dans le bleu-vert et deux raies faibles dans le violet.

Une question se pose maintenant. Quelle est la sensibilité de la méthode spectroscopique pour déceler la présence du radium dans un produit radioactif ? Cette sensibilité est-elle supérieure ou inférieure à celle obtenue en étudiant, à l'électroscope, les propriétés radioactives de la substance ? — Voici les réponses que l'on peut faire à ces deux questions :

La raie principale (3814.7) caractéristique du radium peut être distinguée dans du sel de radium impur ayant une activité 50 fois plus forte que celle de l'uranium. La méthode électrique permet facilement de déceler la présence du radium dans un corps ayant une activité de seulement $\frac{1}{100}$ de celle de l'uranium. Enfin, un électromètre plus sensible peut accuser l'effet produit par une substance radioactive dont l'activité ne dépasse pas $\frac{1}{10000}$ de celle de l'uranium.

Il résulte donc de ce que nous venons de dire que l'examen électrique de la radioactivité est environ un million de fois plus sensible que le procédé d'analyse spectrale. [E. N.]

Il n'est pas difficile de décider sur la nature de radiations, qui appartiennent à l'une ou à l'autre de ces deux catégories. En effet, tandis qu'un champ électrique ou un champ magnétique ne peuvent, en aucune manière, modifier la forme des rayons lumineux, ni celle des rayons de Röntgen, etc., ils agissent au contraire de manière à courber sensiblement la trajectoire parcourue par les particules électrisées, sauf cependant si la vitesse de ces dernières est excessive. Il existe d'autre part, paraît-il, certaines nouvelles radiations, découvertes par M. R. Blondlot [1] et appelées, par ce dernier, rayons N, lesquelles semblent participer aux propriétés des rayons cathodiques, mais qui seraient en outre doués d'autres propriétés très étranges. Leur nature encore énigmatique nous empêche d'en parler ici.

Pour acquérir quelque notion sur la nature des rayons émis par les corps radioactifs, il était donc nécessaire de faire agir sur eux des forces magnétiques ou des forces électriques et, par suite, d'introduire le corps radioactif entre les pôles d'un puissant aimant ou entre deux plaques métalliques électrisées en sens contraire. En outre, pour reconnaître les déformations possibles de ces rayons, il fallait les diriger à travers une mince ouverture pratiquée dans un diaphragme et installer au-delà de cette dernière un corps phosphorescent ou bien une plaque photographique enveloppée dans du papier noir pour la protéger contre l'action de la lumière ambiante. L'écran phosphorescent permettra de suivre le déplacement de la tache lumineuse formée par les nouvelles radiations, si le champ magnétique ou électrique

[1] R. Blondlot. — *Comptes rendus*, t. CXXXVI, p. 1735; (903) et les numéros suivants.

a une action sur ces radiations. La plaque photographique donnera le même résultat après son développement, et l'usage de cette dernière sera, en général, préférable, car la durée de la pose, qui pourra être prolongée à volonté, compensera éventuellement la faible intensité des radiations que l'on étudie.

En appliquant ces méthodes opératoires, l'on reconnaît d'abord qu'un corps radioactif émet en général à la fois des rayons déviables par le champ magnétique et par le champ électrique, et des rayons non déviables par ces derniers. L'on constate en outre que les rayons déviables se comportent comme des rayons cathodiques très rapides, c'est-à-dire comme des rayons constitués par des électrons négatifs lancés en ligne droite avec une vitesse énorme. Nous verrons dans la suite que cette vitesse peut être mesurée, et que le rapport de la charge électrique à la masse de ces électrons a sensiblement la même valeur que celle trouvée dans le cas des rayons cathodiques.

Des recherches ultérieures ont ensuite démontré l'émission, de la part du radium et des autres corps radioactifs, d'autres rayons déviés par les forces magnétique et électrique d'une manière bien moins prononcée que dans le cas des rayons cathodiques et en sens contraire de la déviation de ces derniers. L'on peut donc dire que les corps radioactifs connus émettent trois sortes de rayons et il est probable qu'il en est de même pour tous les corps radioactifs, puisque si l'une quelconque de ces radiations ne se manifestait pas nettement, cela pourrait tenir simplement à ce que la radiation en question est trop faible pour pouvoir facilement être mise en évidence.

Un exemple de cette nature est d'ailleurs offert par

le polonium de Mme Curie qui émet exclusivement, ou presque, des rayons déviables en sens contraire des rayons cathodiques.

Les rayons déviables ne peuvent être considérés que comme constitués par l'émission de particules électrisées. Le sens de la déviation fait connaître le signe de leur charge, pendant que la mesure de la même déviation permet d'évaluer la vitesse dont les particules sont animées, ainsi que le rapport qui existe entre la charge et la masse de chacune d'elles ; par suite, en admettant pour la charge la valeur constante correspondant à l'ion électrolytique d'hydrogène, on arrive à connaître la valeur de la masse de ces particules.

En appelant, avec M. Rutherford, α, β, et γ, les trois espèces de rayons émis par le radium (et en général par tout corps radioactif), voici ce que l'on sait sur ces différents rayons.

La manière dont se comportent les rayons α confirme l'hypothèse de M. Strutt [1], qui les considère comme des ions *positifs* lancés dans toutes les directions par le corps radioactif. Il a, en effet, été constaté par M. E. Rutherford [2], qu'ils transportent une charge positive, pendant que M. H. Becquerel [3] reconnaissait qu'ils sont déviés par un champ magnétique en sens inverse des rayons cathodiques. Ainsi, les rayons émis par une faible quantité de sel de radium contenu dans un petit récipient en plomb P (fig. 14) se propagent en ligne droite dans la direction P C en l'absence du champ magnétique ; mais dès que l'on crée un champ magnétique perpendicu-

(1) Strutt. — *Phil. Trans.*, t. CXCVI, p. 525 ; (1901).
(2) E. Rutherford. — *Phil. Mag.*, p. 177 ; (1903).
(3) H. Becquerel. — *Comptes rendus*, t. CXXXVI, p. 431 (1903).

laire au plan de la figure, les rayons α se séparent des autres en s'incurvant suivant l'arc de cercle P A. En mesurant la vitesse et le rapport de la charge à la masse des particules constituant les rayons α, l'on trouve que la vitesse peut atteindre environ le dixième de celle de la lumière et que le rapport susdit indique que ces particules ont une masse de gran-

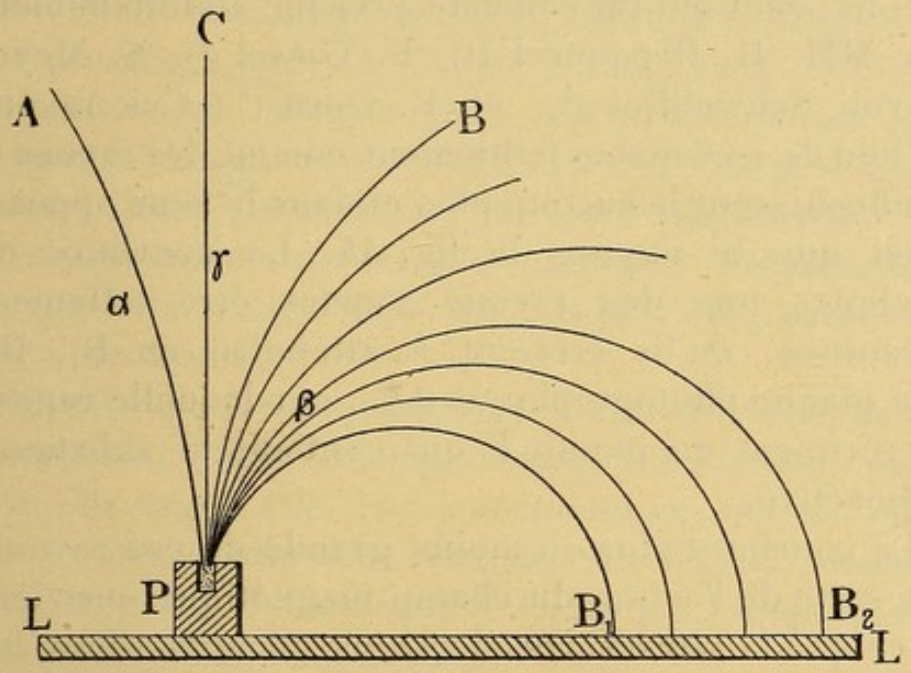

Fig. 14

deur atomique. On peut donc dire que les rayons sont identiques à des « rayons-canaux » possédant une grande vitesse.

C'est aux rayons α que semble spécialement due l'ionisation des gaz; évidemment, par l'effet de leurs chocs. Le phénomène reste circonscrit si le gaz qui entoure le corps radioactif se trouve à la pression ordinaire. En effet les rayons α du radium sont peu pénétrants, une couche d'air de 10 cm. ou bien une lame d'aluminium de moins d'un dixième de mm. d'épaisseur étant suffisantes pour en absorber la majeure partie.

En ce qui concerne les rayons β, ils se comportent en tout comme des rayons cathodiques très pénétrants. Ils sont constitués par des électrons *négatifs* lancés dans toutes les directions ; leur vitesse est énorme, puisqu'elle peut devenir très voisine de celle de la lumière. Cela résulte, en particulier, de l'effet que produit le champ magnétique sur ces rayons, effet qui fut constaté presque simultanément par MM. H. Becquerel [1], F. Giesel [2], S. Meyer et von Schweidler [3], et E. Dorn [4]. Ces rayons au lieu de se courber faiblement comme les rayons α, s'infléchissent beaucoup plus et dans le sens opposé, ainsi que le montre la fig. 14. La courbure de quelques uns des rayons β peut être tellement accentuée, qu'ils arrivent à atteindre en B_1, B_2, une plaque photographique (LL), sur laquelle repose le récipient en plomb P qui contient la substance radioactive.

La courbure plus ou moins grande de ces rayons, par suite de l'action du champ magnétique, provient de ce que la vitesse des électrons négatifs, dont les rayons β ne sont que les trajectoires, a des valeurs différentes. Ceux qui ont la vitesse la plus petite sont ceux auxquels le champ magnétique fait parcourir les demi-circonférences de plus petit rayon, tandis que ceux doués de grandes vitesses parcourront des arcs de circonférence de rayon plus grand. On s'explique ainsi pourquoi sur les plaques photographiques l'on obtient une image allongée. Il est facile de vérifier au moyen de cette image que les

(1) H. Becquerel. — *Comptes rendus*, t. CXXIX, p. 912 ; (1899).
(2) F. Giesel. — *Wied. Ann.*, t. LXIX, p. 834 ; (1899).
(3) S. Meyer et E. von Schweidler. — *Physik. Zeitschr.*, t. I, p. 90 et 113 (1899).
(4) E. Dorn. — *Comptes rendus*, t. CXXX, p. 1126 (1900).

rayons les moins déviés, constitués par des électrons animés de très grandes vitesses, sont en outre les plus pénétrants. En effet, une lame disposée sur le trajet des rayons β absorbe plus que les autres les rayons plus déviés proches de B_1. La variété des rayons β est, du reste, assez grande ; et pendant que certains sont arrêtés déjà par une lame d'aluminium de 1/100 de mm. d'épaisseur, d'autres peuvent traverser plusieurs mm. de plomb. M. et Mme Curie [1] démontrèrent, d'autre part, directement, que les rayons β transportent réellement des charges négatives. Dans l'expérience de ces physiciens, les rayons α étaient arrêtés par une lame d'aluminium, de sorte que seul, l'effet des rayons β était manifesté par l'électromètre.

Tandis que les rayons α et β sont déviés dans un champ électrique ou magnétique, les rayons γ ne le sont pas tout à fait. Par conséquent ces rayons, émis par le corps radio-actif contenu en P (fig. 12), conservent leur allure rectiligne P C, même lorsqu'on fait agir sur eux un champ magnétique.

De même que les rayons β, les rayons γ ne sont pas homogènes et ils comprennent des rayons plus ou moins pénétrants. Cette propriété les rapproche beaucoup des rayons de Röntgen, et ils sont aujourd'hui considérés comme étant de même nature. On a, d'autre part, reconnu que la conductibilité excitée par les rayons γ dans différents gaz n'est pas proportionnelle à celle produite par les rayons X, ce qui semblerait établir une différence de nature entre les deux espèces de rayons. Mais de récentes expériences ont démontré, que cette divergence tient

---

[1] P. et S. Curie. — *Comptes rendus*, t. CXXX, p. 647 (1900).

seulement à ce que dans leur ensemble les rayons γ sont comparables seulement aux plus pénétrants des rayons X. En effet, les rapports entre la conductibilité produite dans différents gaz par les rayons γ et par les rayons X tendent vers l'unité, lorsqu'on compare les rayons γ aux rayons X produits par des tubes *durs* ayant traversé une lame de plomb avant d'arriver au gaz qu'ils doivent ioniser.

Lorsque les trois espèces de rayons frappent ou traversent les différents corps, il se produit, suivant la nature de ces corps, divers effets qui sont particulièrement évidents, quand on se sert d'un sel de radium ; quelques uns de ces effets n'ont même été observés jusqu'ici qu'avec cette substance. Il n'est pas possible d'isoler complètement les rayons d'une seule espèce des autres, et d'étudier séparément les phénomènes provoqués par eux ; mais l'on réussit, au moyen de l'interposition de plaques absorbantes, à retenir les rayons les moins pénétrants, par exemple, les rayons α, ou bien ceux-ci avec une partie des rayons β ; on peut enfin laisser passer seulement les rayons γ. Cela suffit dans beaucoup de cas pour pouvoir reconnaître les effets produits par chacun de ces rayons individuellement.

Les effets produits par les corps radioactifs et particulièrement par le radium, peuvent être classés en effets lumineux, effets chimiques, effets électriques, effets mécaniques, effets calorifiques et effets physiologiques. Voici à peu près ce que l'on peut dire à ce sujet, en outre de ce qui a déjà été dit précédemment.

La phosphorescence et la fluorescence semblent résulter surtout de l'action des rayons α et β ; certains corps deviennent plus lumineux quand ils

sont frappés par les rayons α, tandis que certains autres sont plus sensibles aux rayons β. La blende hexagonale, par exemple, s'illumine particulièrement bien sous l'action des rayons du radium.

Sir Crookes a imaginé un petit instrument, appelé *spinthariscope* (1), qui permet précisément d'observer l'effet produit par le radium sur un écran recouvert de sulfure de zinc phosphorescent. Un fragment d'un sel de radium est disposé à un demi-millimètre environ de distance de l'écran et l'on observe ce dernier au moyen d'une loupe ou d'un microscope. L'on aperçoit, dans ces conditions, des points brillants, qui apparaissent çà et là et qui s'éteignent immédiatement donnant ainsi un effet de scintillation. Chaque point lumineux serait engendré, d'après Crookes, par le choc d'un ion positif (2). D'après Becquerel, cette scintillation serait

(1) W. Crookes. — *Proc. Roy. Soc.*, t. LXXI, p. 405; (1905).

Le mot spinthariscope vient des mots grecs σπινθαρίς, scintillation et σκοπεῖν, examiner. [E. N.]

(2) Deux mots de plus sur ce curieux phénomène découvert par M. W. Crookes. Voici comment il fut amené à imaginer son spinthariscope. Il remarqua qu'en faisant tomber quelques grains imperceptibles de sel de radium sur un écran de sulfure de zinc, la surface de ce dernier en est immédiatement parsemée de petits points brillants d'une lumière verte. En examinant ces points lumineux, dans une chambre noire, sous un microscope, chacun de ces points présente un noyau obscur entouré d'un halo de lumière diffuse, et, en dehors du halo, la surface obscure de l'écran est sillonnée d'étincelles lumineuses paraissant et disparaissant instantanément sans que l'on perçoive aucun mouvement de translation.

Si, maintenant, au lieu de déposer le grain de sel de radium sur l'écran phosphorescent, on l'y approche seulement, une simple loupe de poche nous montre çà et là quelques points lumineux entourés d'étincelles. En approchant davantage le sel de radium de l'écran, les scintillations deviennent plus nombreuses et plus brillantes, et lorsque la substance radioactive n'est plus qu'à une fraction de $^{m}/_{m}$ de l'écran, les étincelles se succèdent avec une telle rapidité que la surface de l'écran présente l'aspect « d'une mer lumineuse en furie », suivant l'expression de M. Crookes.

Il convient maintenant d'ajouter que le nitrate basique de polonium

due à la rupture ou au clivage des cristaux formant la couche phosphorescente ; on obtient en effet des effets analogues en écrasant le corps entre deux plaques de verre [1]. Quoiqu'il en soit, ce singulier phénomène lumineux du spinthariscope paraît être dû indirectement au bombardement produit par les rayons α sur le corps phosphorescent.

Les sels de radium sont lumineux et l'on attribue cette luminosité à une phosphorescence excitée par les rayons émis par ces sels mêmes. Mais l'on peut supposer que cette phosphorescence soit produite par le choc des ions α ou des électrons β, non pas contre les molécules du corps radioactif, mais contre celles du gaz ambiant ou des gaz qui se dégagent lentement des sels de radium ; et l'on pourrait enfin supposer, que la cause de ce phénomène lumineux réside dans la transformation du radium en *émanation*, dont on parlera plus loin. En attendant, il a été reconnu par M. et Mme

---

l'actinium et le platine radioactif produisent un effet analogue sur l'écran de sulfure de zinc phosphorescent, mais les scintillations sont moins nombreuses.

Le vide ne modifie pas l'aspect et l'intensité de ces scintillations : elles sont aussi brillantes que dans l'air.

Les plus basses températures sont également sans effet : Dans l'hydrogène liquide, elles sont aussi brillantes qu'à la température ordinaire. Cela prouverait, selon M. Crookes, qu'elles sont dues à un mouvement interatomique.

« *Il est probable,* dit M. Crookes dans sa conférence au Congrès de chimie appliquée de Berlin, 1903, *que, dans ces phénomènes, ce que nous voyons, en réalité, c'est le bombardement de l'écran par les ions positifs lancés par le radium avec une vitesse analogue à celle de la lumière* ». Chaque particule n'est rendue visible que par la perturbation latérale énorme produite par son choc sur la surface de l'écran *exactement de la même façon que chaque goutte d'eau tombant sur la surface d'une eau tranquille n'est pas perçue en tant que goutte d'eau, mais en raison de la légère éclaboussure qu'elle cause au moment du choc, des rides et des vagues qui s'élargissent en cercles.* [E. N.]

[1] H. Becquerel, — *Comptes rendus*, p. 629, 27 oct. 1903.

Huggins [1], que le spectre de la lumière émise par le radium est constitué par des raies coïncidant avec quelques unes de celles qui appartiennent au spectre de l'azote, et qu'il est identique ou presque identique à celui de la « lueur négative » produite dans l'air à la pression ordinaire.

Récemment, M. H. Becquerel [2] a remarqué, que les sels d'uranium sont également spontanément lumineux. Il suffit, pour s'en convaincre, de regarder avec l'œil reposé, pendant la nuit lorsqu'on se réveille par exemple, un vase de verre contenant de l'azotate d'uranium. M. A. Righi a en outre remarqué que, dans les mêmes conditions, on observe une vive scintillation lorsque l'on agite le vase contenant le sel; par conséquent il convient de ne pas trop agiter le vase, si l'on veut constater l'émission spontanée de la lumière et non pas la lueur, probablement d'origine électrique, qui est due aux secousses.

Les substances phosphorescentes s'altèrent sous l'action des rayons émis par le radium et changent souvent de couleur; le verre ordinaire prend une teinte violette ou noirâtre et, ainsi modifié, il devient *thermoluminescent*, c'est-à-dire qu'il devient lumineux lorsqu'on le chauffe vers 500°.

Ces modifications sont probablement d'ordre chimique comme celles auxquelles on doit les images sur les plaques photographiques.

Vu les différents degrés d'absorption que les corps de différentes densités exercent sur les rayons du radium, il est possible d'obtenir des *radiographies* analogues à celles, aujourd'hui si connues,

(1) W. Huggins et Lady Huggins. — *Proc. Roy. Soc.*, p. 196 (1903).
(2) H. Becquerel. — *Comptes rendus*, 15 janvier 1904.

que l'on obtient avec les rayons X. Néanmoins, ces dernières sont toujours de beaucoup les plus parfaites [1].

Voici encore certaines autres actions chimiques produites par les corps radioactifs et particulièrement par le radium.

Suivant M. Becquerel, une solution de bichlorure de mercure et d'acide oxalique (6 gr. 5 de bichlorure de mercure, 12 gr. 5 d'acide oxalique et 100 gr. d'eau) dépose du calomel sous l'action des rayons du radium; ces derniers agissent donc dans ce cas comme les rayons lumineux. Sous l'action des rayons du radium, le phosphore ordinaire se transforme en phosphore rouge, et l'oxygène se transforme en ozone. Il semble, d'autre part, qu'on doive attribuer aux modifications chimiques les changements de couleur qui ont lieu dans le verre, le platinocyanure de baryum, etc.. Cette dernière substance perd en même temps de sa phosphorescence, mais la lumière solaire la rétablit facilement. Il convient encore de noter un fait assez singulier, c'est que les rayons du radium ne modifient pas sensiblement l'iodure d'argent des plaques de Daguerre.

Puisque les rayons α et β consistent en une émission d'ions positifs et d'électrons négatifs, il est naturel qu'en arrêtant les uns à l'exception des autres, on doive produire des charges électriques.

---

[1] Cela tient à ce que les électrons sont beaucoup moins pénétrants que les rayons X. Les photographies prises avec les corps radioactifs ne révèlent que difficilement les os de la main, par exemple. En outre, le temps de pose est très différent. C'est ainsi que la photographie d'objets enfermés dans une boîte exige environ 3 minutes avec les rayons X, alors que, si l'on emploie une substance radioactive, il faut environ 3 jours de pose. D'ailleurs, les photographies présentent de légères ressemblances et de très grandes différences.

[E. N.]

Les corps radioactifs deviennent ainsi une source continue d'électricité. Si, on n'effectue aucune filtration des rayons, le corps radioactif devrait encore s'électriser si la quantité d'électricité positive transportée par les rayons α n'était pas égale à celle portée au loin en même temps par les rayons β. Des expériences convenablement disposées ont montré que cela n'a pas lieu et qu'il y a compensation entre les charges des deux signes. Mais si on arrête (avec une capsule de verre, pas trop mince, par exemple) les rayons α, cette capsule s'électrise positivement. L'expérience fût faite par M. Wien, [1] au moyen d'un peu de bromure de radium placé dans un tube de verre enveloppé d'une feuille d'aluminium et suspendu à l'intérieur d'un tube à vide. Il est nécessaire de faire le vide afin que la charge positive ne puisse se disperser en vertu de la conductibilité du gaz ionisé. Dans certains cas, on est même arrivé à obtenir des étincelles, par exemple, en ouvrant un tube contenant du radium [2].

Un élégant appareil (fig. 15) imaginé par Strutt [3] met nettement en évidence la production continuelle d'électricité au moyen du radium. Dans un récipient de verre, hermétiquement fermé, et dans lequel on a fait un bon vide, se trouve un petit tube fermé *a* contenant un corps radioactif. Ce petit tube est fixé à un petit isolateur de quartz fondu *b* , et sa surface est recouverte d'une couche conductrice (par exemple, un enduit d'acide phosphorique); il

---

(1) W. Wien. — *Physik. Zeitschr.*, t. IV, p. 624 (1903).
(2) E. Dorn. — *Physik. Zeitschr.*, t. IV, p. 507 (1903).
(3) R. J. Strutt. — *Phil. Mag.*, p. 588 (nov. 1903).

supporte en outre deux feuilles d'or *c c* formant électroscope.

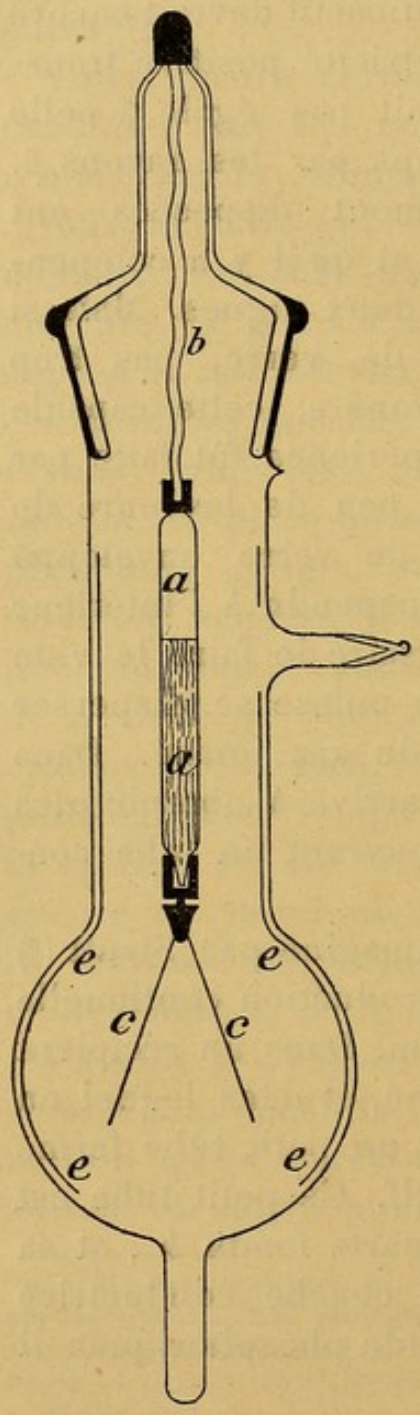

Fig. 15

On remarque que ces feuilles sont continuellement animées d'un mouvement lent. Elles s'écartent petit à petit jusqu'à toucher la feuille d'étain *e e* appliquée sur la paroi et communiquant avec le sol. Elles retombent alors instantanément pour recommencer ensuite lentement le même mouvement. Cet effet est dû à la charge positive que les rayons α absorbés abandonnent sur le tube, pendant que la charge négative est transportée au loin par les rayons β.

Un autre effet d'ordre électrique dû aux rayons du radium se manifeste, d'après M. Curie, de la manière suivante. On dispose deux conducteurs de telle manière, que la charge d'une machine électrique ou d'une bobine puisse suivre deux voies différentes sur chacune desquelles on a une interruption (une coupure) pour la formation d'une étincelle. Lorsque ces deux interruptions sont équivalentes, c'est-à-dire que la décharge suit indifféremment l'un ou l'autre

des deux chemins qui lui sont offerts, il suffit d'approcher un sel de radium d'une des deux interruptions, pour que l'étincelle de décharge éclate dans celle là et non plus dans l'autre. Les rayons du radium produisent donc une action semblable à celle qui, en certaines circonstances, est exercée par les rayons de Röntgen, et qui favorise la production de l'étincelle.

Un dernier effet électrique du radium récemment annoncé est la diminution de résistance qu'éprouve le bismuth sous forme de lames minces quand on approche de ce métal, et à une très faible distance, le corps radioactif.

Puisque les rayons α consistent en ions positifs, l'émission de ces derniers est nécessairement une émission de matière ; et, ainsi qu'on le verra, on pourrait en dire autant, sous certains points de vue, des rayons β. Il faut donc prévoir une diminution du poids des corps radioactifs. M. Heidweiller [1] croit avoir observé cette diminution de poids, mais M. Dorn [2] n'a pu en avoir confirmation, quoiqu'ayant employé un corps de la plus grande radioactivité.

Il s'agit donc d'une diminution de masse si faible qu'elle échappe à nos moyens de détermination.

L'émission des différentes espèces de rayons est accompagnée dans le radium d'une production continuelle de chaleur. MM. P. Curie et A. Laborde [3] reconnurent, en effet, qu'une faible quantité d'un sel de radium conservait constamment une température plus élevée que la température ambiante.

L'expérience, très simple, a été réalisée de la ma-

---

(1) A. Heidweiller. — *Phys. Zeitschr.*, t. IV, p. 81 (1902).

(2) E. Dorn. — *Phys. Zeitschr.*, t. IV, p. 81 (1902).

(3) P. Curie et A. Laborde. — *Comptes rendus*, t. CXXXVI, p. 973 (1903).

nière suivante par Mme Curie. Une petite ampoule de verre, fermée, renfermant 7 décigr. de bromure de radium pur, est mise dans un vase de verre à double paroi, fermé avec du coton et contenant un thermomètre à mercure. On fait le vide entre les deux parois du vase, et l'on obtient ainsi un vase analogue à ceux adoptés pour conserver l'air liquide, à cause de leur bon isolement calorifique. Un second thermomètre est introduit dans une petite ampoule identique à la première mais qui, au lieu de la substance radioactive contient un corps inactif, du chlorure de baryum, par exemple, et elle est placée dans un vase à double paroi et à vide comme dans le premier cas. Une fois l'équilibre de température établi, on observe que le premier thermomètre, qui se trouve dans le vase contenant la substance radioactive, marque une tem pérature d'environ 3° supérieure à celle indiquée par le deuxième thermomètre.

Pour mesurer la quantité de chaleur continuellement dégagée par les sels de radium on en introduit une petite quantité dans un calorimètre de Bunsen. On déduit de la quantité de glace fondue dans un temps déterminé, que la chaleur dégagée en une heure par le corps radioactif serait suffisante pour fondre un poids de glace égal au sien, ou encore pour élever d'environ 80° la température d'un poids égal d'eau (1). L'on voit donc que la quantité de chaleur fournie par le radium est relativement assez grande (2).

---

(1) Chaque gramme de radium dégage donc environ 80 petites calories pendant chaque heure. [E. N.]

(2) Il convient de faire remarquer qu'un sel de radium, *qui vient d'être préparé*, dégage une quantité de chaleur relativement faible. Mais la chaleur dégagée, en un temps donné, augmente ensuite continuellement et tend vers une limite déterminée qui n'est pas encore tout à fait atteinte au bout d'un mois.

Le même fait se produit avec une dissolution (dans l'eau) du sel de

Un effet thermique d'un autre genre a été observé par M. Georgiewski [1]. D'après cet auteur, tandis que la vitesse de refroidissement d'un corps chaud ne varie pas quand on ionise avec les rayons du radium le gaz qui l'entoure, ce refroidissement s'accélère lorsque le corps chaud est électrisé, et surtout lorsqu'il l'est négativement. Ce résultat fut observé non seulement avec l'air, mais encore avec d'autres gaz, soit que l'on laissât tous les rayons du radium agir en bloc, soit que l'on interceptât les rayons α.

Les rayons du radium, et, en général, ceux provenant des corps radioactifs, en frappant un corps inactif lui font émettre de nouveaux rayons dits *rayons secondaires*. Cette émission est contemporaine de l'action des rayons incidents, ce qui distingue ce phénomène de celui de la radioactivité induite dont on parlera plus loin. La propriété d'exciter des rayons secondaires appartient encore à d'autres radiations, comme les rayons X et les rayons cathodiques, et généralement les rayons secondaires diffèrent des rayons

---

radium, et l'on constate que, lorsque l'état limite est atteint, le sel de radium, enfermé en tube scellé, dégage la même quantité de chaleur à l'état solide et à l'état de dissolution.

MM. Dewar et Curie ont, en outre, évalué la chaleur dégagée par le radium *à diverses températures*. On utilise, à cet effet, le radium pour faire bouillir un gaz liquéfié et en mesurant le volume du gaz qui se dégage. L'expérience a été faite avec l'oxygène liquide (à — 180°) et l'hydrogène liquide (à — 292°). On peut également faire l'expérience avec du chlorure de méthyle (à — 21°). L'hydrogène liquide convient particulièrement pour cette expérience, et MM. Dewar et Curie ont constaté un dégagement de 73^{cmc} de gaz hydrogène par minute.

Ajoutons enfin que le sel de radium semble cependant toujours rester dans le même état. Du reste, aucune réaction chimique ordinaire ne pourrait être invoquée pour expliquer un pareil dégagement continu de chaleur. [E. N.]

[1] Georgiewski. — *Journ. de la Soc. Phys. chim. russe*, t. XXXV, p. 353; (1903).

excitateurs [1]. Ainsi l'on peut dire que les rayons X sont des rayons secondaires produits par les rayons cathodiques, lesquels à leur tour peuvent être engendrés par les rayons X [2]. Ces derniers produisent en outre des rayons secondaires de même nature qu'eux-mêmes mais moins pénétrants. Les rayons lumineux et ultraviolets peuvent donner des rayons cathodiques comme rayons secondaires, etc., les rayons des corps radioactifs produisent également des effets de ce genre, que l'on n'a pas encore étudiés d'une manière complète.

Outre les effets déjà décrits, les rayons émis par le radium produisent des actions très prononcées sur les tissus vivants, qui peuvent aller jusqu'à la production de profondes lésions difficiles à guérir. M. Becquerel et Mme Curie eurent l'occasion de le constater à leurs dépens [3]. D'après M. Danisz [4],

---

(1) La découverte des rayons secondaires ou rayons S est due à M. G. Sagnac qui montra que tous les corps, frappés par les rayons X, émettent de nouveaux rayons que nous pouvons appeler rayons S, qui jouissent de propriétés analogues à celles des rayons X incidents mais qui se distinguent des rayons X générateurs en ce qu'ils sont plus facilement absorbés par les différents corps et en particulier par les gaz. Il en résulte que leurs effets ne peuvent se manifester qu'à de courtes distances.

L'énergie totale des rayons S est de beaucoup inférieure à celle des rayons X excitateurs.

L'air lui-même diminue le pouvoir de pénétration des rayons X en les transformant, mais à un bien moindre degré que les métaux. Ces derniers agissent d'ailleurs d'une manière très différente, suivant leur nature Il en résulte donc qu'il y a tout une série de rayons S qui diffèrent entre eux à la manière des radiatlons lumineuses.

M. Sagnac constata que les rayons S peuvent, à leur tour, engendrer des rayons tertiaires ou rayons T, jouissant des mêmes propriétés que les premiers, mais plus absorbables par l'air. [E. N.]

(2) A. Righi. — *Mem. della R. Acc. di Bologna* (V), t. X p. 595 (1903).

(3) H. Becquerel et P. Curie. — *Comptes rendus*, t. CXXXII, p. 1289 (1901).

(4) J. Danisz. — *Comptes rendus*, t. CXXXVI, p. 461 ; (1903 .

un petit tube contenant un corps fortement radioactif posé sur la peau d'un animal provoque une destruction complète de l'épiderme et du derme, tandis que l'action sur les tissus sous-jacents est relativement assez faible. Le système nerveux est au contraire assez sensible à l'action du radium, de sorte qu'en peu de temps se produisent des lésions capables d'amener la paralysie et la mort. L'effet produit sur les bactéries est également notable, puisque d'après MM. Aschkinass et Gaspari (1), le développement de certaines espèces de bactéries est arrêté. Les larves de certains insectes meurent également, et l'action prolongée des rayons du radium sur des graines de plantes leur enlève la faculté de germer. Il semble, d'autre part, qu'en compensation des actions délétères exercées, les rayons émis par les corps radioactifs puissent réussir à être utiles dans certaines maladies, comme le cancer et le lupus (2).

La sensation de lumière qui emplit le champ visuel lorsque l'on approche de l'œil une préparation de radium, n'est pas un effet physiologique direct, mais s'explique par la phosphorescence des diverses parties constitutives de l'organe visuel provoquée par les rayons du radium. Le phénomène se produit encore sur les yeux des aveugles pourvu

---

(1) Aschkinass et Gaspari. — *Archiv. für die Ges. Physiol.*, t. LXXXVI (1901).

(2) Danlos. — *Soc. de Dermat.*, 7 nov. 1901.

Tout dernièrement (26 juillet 1904) MM. les docteurs Raymond (de la Salpêtrière) et Zimmer ont constaté l'action du radium comme analgésique (anesthésique local) dans les affections du système nerveux, ayant une influence marquée sur l'élément « douleur ». Des crises gastriques, des douleurs fulgurantes ont été soulagées au bout de quelques séances.

[E. N.]

que la rétine et le nerf optique soient dans les conditions normales.

Enfin, d'après M. E. Bloch [1], les rayons du radium agiraient comme la lumière sur le sélénium cristallisé, en augmentant sa conductibilité électrique.

Les corps radioactifs ou du moins le radium et le thorium, outre qu'ils émettent les rayons α, β et γ, laissent continuellement dégager une partie de leur substance sous une autre forme.

Certaines expériences relatives à l'ionisation de l'air produite par les composés du thorium conduisirent M. Rutherford à découvrir l'*émanation* radioactive. Déjà M. Owens [2] avait noté une bizarre irrégularité dans l'action ionisante des rayons de l'oxyde de thorium ; mais ce fut Rutherford qui en donna l'explication [3], en démontrant que le thorium émettait continuellement des particules radioactives, dont l'action ionisante s'ajoutait à celle due aux rayons α, β ou γ. Le radium produit aussi son *émanation*, et les particules constituant son émanation se distinguent de celles constituant les rayons α et β en ce que les premières se diffusent lentement, à la manière des molécules d'un gaz, au lieu d'être lancées comme les secondes avec une vitesse énorme.

En effet, l'émanation se mêle au gaz ambiant et peut être transportée avec lui d'un endroit à un autre. Enfin M. Traubenberg [4] confirma que l'émanation se comporte comme un véritable gaz en établissant que l'émanation contenue dans l'eau potable

(1) E. Bloch. — *Comptes rendus*, 7 nov. t. CXXXII, p. 914 (1901)
(2) E. Rutherford. — *Phil. Mag.*, t. XLIX. p. 161 (1900).
(3) R. B. Owens. — *Phil. Mag.*, t. XLVIII, p. 361 (1899).
(4) H. R. Von Traubenberg. — *Phys. Zeitschr.*, p. 130. mars 1904.

de Fribourg (généralement les eaux de source contiennent des substances radioactives), ainsi que l'émanation du radium, obéissent aux lois de Dalton et de Henry, qui sont suivies par les gaz.

L'émanation passe facilement à travers les pores ou les fentes les plus fines, alors que les gaz ordinaires ne pourraient y circuler qu'avec une extrême lenteur. Elle n'est radioactive que temporairement, c'est-à-dire que sa radioactivité diminue d'une manière continue, de sorte qu'au bout d'une minute l'émanation du thorium a sa propre activité réduite de moitié de la valeur initiale, tandis que celle du radium perd son activité bien plus lentement, car elle est réduite de moitié seulement au bout d'environ quatre jours.

MM. Rutherford et Soddy [1] ont, d'autre part, démontré, que l'émanation du radium se condense à une température d'environ 150° *au-dessous* de zéro. Si, en effet, on fait circuler dans un tube entouré d'air liquide un courant de gaz qui a passé sur un composé de radium, le gaz sort du tube entièrement débarrassé de l'émanation. Cette dernière redevient ensuite gazeuse si on laisse la température s'élever au-dessus de la valeur indiquée ci-dessus. Il est facile de suivre les changements d'état physique de l'émanation, parce qu'elle est lumineuse et rend lumineux le verre du tube qui la contient. L'émanation du thorium se condense à une température un peu moins basse.

L'émanation a la propriété de rendre temporairement actifs les corps avec lesquels elle arrive en contact. Cette radioactivité ainsi acquise par les

---

(1) E. Rutherford et F. Soddy. — *Phil. Mag.*, p. 561, mai 1903.

corps qui ne la possédaient pas primitivement a été, semble-t-il, observée pour la première fois par M. et Mme Curie [1], et on lui donna le nom de *radioactivité induite*. D'après M. Rutherford, elle serait due à une substance solide invisible déposée par l'émanation sur les corps en quantité inappréciable, et qui peut être dissoute par certains acides et non par d'autres. En faisant évaporer la solution ainsi obtenue on recueille un résidu radioactif. Il semble en outre que l'émanation adhère et imbibe pour ainsi dire les corps qu'elle rend actifs, puisque ces corps émettent ensuite eux-mêmes de l'émanation. Le celluloïd, la gomme élastique, la paraffine absorbent puis restituent l'émanation en quantité notable. Indépendamment de cela, on a reconnu qu'en chauffant un corps rendu radioactif par induction, il perd une grande partie de sa propre activité, qu'il cède aux corps froids environnants.

La charge négative d'un corps facilite la production de sa radioactivité induite. Ainsi il suffit d'exposer, comme l'ont fait MM. Elster et Geitel, [2] un conducteur fortement chargé négativement (ou encore, dans certains cas, chargé positivement, d'après M. Sella [3], à l'air libre pendant quelques heures pour le rendre radioactif, ce qui indique l'existence dans l'atmosphère d'une émanation analogue à celle émise par le radium et le thorium.

On peut encore produire la radioactivité des substances par elles-mêmes inactives, en opérant d'une autre manière. Il suffit de dissoudre le corps inactif dans un liquide contenant un corps actif,

---

(1) P. et S. Curie. — *Comptes rendus*, t. CXXIX (1899).

(2) Elster et Geitel. — *Phys. Zeitschr.*, t. III, p. 76 (1901).

(3) A. Sella. — *Il Nuovo Cimento*, t. III, p. 138 ; t. IV, p. 131 (1902).

puis de le séparer par des moyens chimiques. On obtient ainsi du bismuth actif, après avoir dissous du bismuth dans une solution contenant du radium. En général, le corps rendu radioactif de cette manière perd peu à peu son activité; c'est ainsi que le polonium a été considéré par certains auteurs comme du bismuth rendu actif par dissolution. De même un sel de baryum devient radioactif, si on le sépare d'une solution d'uranium; ce dernier perd une partie de sa radioactivité, qui est ensuite récupérée lentement.

Un phénomène analogue au précédent, et dont nous reparlerons plus tard, est celui décrit par M. Rutherford. Il consiste dans la séparation chimique du thorium en deux portions, dont l'une assez active, appelée thorium X, perd peu à peu, avec le temps, sa radioactivité, tandis que l'autre portion acquiert progressivement la propriété perdue par la première.

La production continue de chaleur ainsi que l'émission des rayons α, n'appartiennent pas entièrement au radium mais en partie à l'émanation qui s'en dégage. Si avec un échauffement convenable d'un sel de radium, on libère autant d'émanation qu'il peut en donner, et si on recueille une partie de cette dernière dans un tube refroidi dans de l'air liquide, on reconnaît, lorsque le tube avec le radium et le tube contenant l'émanation se sont mis en équilibre de température, que la quantité de chaleur produite par unité de temps par le radium va en diminuant, pendant que celle développée par l'émanation va en augmentant de sorte que la somme des deux conserve une valeur sensiblement constante [1]. Si ensuite

[1] E. Rutherford et H.-T. Barnes. — *Phil. Mag.*, p. 202, (fév. 1902).

au moyen de l'ionisation d'un gaz, l'on mesure l'émission des rayons α par le radium et par l'émanation, on reconnaît une allure en tous points analogue à celle de l'émission de la chaleur. Ceci conduit à supposer [1], que la chaleur développée par le radium serait due aux collisions des ions positifs (rayons α) avec les molécules d'air ou avec celles de la substance radioactive elle-même. La vitesse trouvée pour les rayons α, qui peut atteindre un dixième de celle de la lumière, est telle qu'elle satisfait à cette hypothèse; mais de toute manière l'origine de l'énergie, dont le radium semble être une source intarissable, reste encore inexpliquée.

Il est probable que la radioactivité est une propriété possédée à divers degrés par tous les corps. Il résulte, en effet, d'expériences récentes, qu'un électroscope électrisé, celui de la fig. 10, par exemple, se décharge avec des vitesses différentes suivant la nature des parois du récipient dans lequel il est enfermé [2], et l'on attribue ce phénomène à la radioactivité des parois mêmes. Il semble, en outre, que des radiations très pénétrantes, provenant peut-être de l'atmosphère ou des corps environnants, existent continuellement autour de nous, produisant une légère ionisation des gaz, puisque la rapidité de décharge dont nous venons de parler est rendue plus petite en entourant l'appareil avec une grosse enveloppe de plomb [3]. On pourrait même soupçonner que la légère radioactivité des corps usuels fût, en

(1) O. Lodge. — *Nature*, 2 avril 1903.

(2) J.-J. Thomson. — *Nature*, 26 février 1903; R.-J. Strutt, *Phil. Mag.*, p 6080, (juin 1903); J.-C.-M. Lenham et F.-E. Burton *Phil. Mag.*, p. 692 juin (1903).

(3) E. Rutherford. — *Nature*, 1903, p. 511; H. Lester Cooke, *Phil. Mag.*, p. 403. (octobre 1903).

partie du moins, une émission de rayons secondaires excités par ces radiations supposées existant toujours.

Le fait que l'air, lorsqu'il vient d'être retiré par aspiration du sol, à une conductibilité électrique supérieure à la conductibilité normale, a une importance spéciale. Comme on a en outre reconnu que beaucoup d'eaux de puits ou de source, l'eau de Cambridge, par exemple, (1) contiennent un gaz radioactif, qui se mêle à l'air que l'on fait barboter dans ces eaux, on est ainsi conduit à supposer avec MM. Elster et Geitel (2), que dans le terrain végétal il existe en faible quantité une substance radioactive qui pourrait être le radium, dont l'émanation, transportée avec l'air enfermé dans ces terrains mêmes, se dissout en faible quantité dans les eaux de sources. M. Allen (3), qui a reconnu la radioactivité de la source de King's Bath, met en avant une idée digne d'être prise en considération, à savoir que l'action thérapeutique des eaux minérales pourrait être due, du moins en partie, à une émanation ou à un gaz radioactif contenu dans ces eaux. On aurait là l'explication du fait, très souvent affirmé à défaut de preuves absolues, que les eaux deviennent moins efficaces lorsqu'elles sont transportées.

La présence des émanations radioactives dans les sources d'acide carbonique et de certaines eaux thermales, et la radioactivité relativement notable présentée par le dépôt laissé par ces dernières, font supposer que la proportion de radium ou d'autre substance radioactive augmente avec la

---

(1) J.-J. Thomson. — *Nature*, p. 90, 1903.

(2) J. Elster et H. Geitel. — *Phys. Zeitsch.*, p. 11, 1904.

(3) H.-S. Allen. — *Nature*, 13 août 1903.

profondeur [1]. Instituer des recherches sur les produits volcaniques aurait donc quelque intérêt.

La neige récemment tombée est radioactive ; M. Righi a eu l'occasion de constater que dans une journée de neige, la conductibilité de l'air était plus du double de la valeur habituelle.

Tout ce qui est exposé dans le présent chapitre constitue un puissant ensemble de faits, en bonne partie constatés avec une certitude absolue, mais que quelque nouvelle découverte pourrait nous montrer sous un aspect différent de celui sous lequel il se présente aujourd'hui.

Il serait donc prématuré de formuler dès aujourd'hui une théorie de la radioactivité, si la nature de ce phénomène n'était mise en si grande évidence par les propriétés reconnues aux rayons émis et à l'émanation. Il est hors de doute, en effet, qu'un corps radioactif émet continuellement une partie de la matière qui le constitue, et qu'il doit par suite avoir une existence limitée ; la théorie des électrons, complétée ainsi qu'on le verra dans le dernier chapitre, et suivant laquelle les atomes sont des systèmes d'électrons, semble faite exprès pour l'expliquer. Mais une théorie de la radioactivité devrait en outre pouvoir expliquer l'origine de l'énergie, qui est rendue disponible pendant la désagrégation des corps radioactifs.

Certains auteurs pensent que cette énergie provient d'une radiation inconnue traversant, partout, l'espace d'une façon continue [2]. Cette radiation imprimerait aux parties constituantes des atomes de cer-

---

(1) E. Rutherford. — *Nature*, p. 511 (1903).
H. Lester Cooke. — *Phil. Mag.*, p. 403, octobre 1903.

(2) Mme Curie. — *Revue générale des Sciences*, 30 janv. 1899.

tains corps des vitesses énormes, au point de les séparer. Si une telle radiation existait réellement, elle devrait vraisemblablement être absorbée par les corps radioactifs, de sorte qu'une enceinte formée de ces derniers devrait diminuer la radioactivité d'un corps contenu à l'intérieur. On n'a jamais pensé peut-être à une expérience de ce genre, et faite en ces termes précis, mais MM. Elster et Geitel [1] ont reconnu, que la radioactivité d'un corps donné ne s'affaiblit pas si on le porte sous la terre, dans une mine, par exemple, à une profondeur de 800 mètres ; et il serait peu vraisemblable que cette couche n'absorbât pas, d'une manière sensible, les radiations supposées traversant l'espace.

Il semble donc qu'on doive préférer l'hypothèse, suivant laquelle l'énergie des corps radioactifs aurait une origine analogue à celle de l'énergie thermique fournie par les combinaisons chimiques, avec la différence que, dans ce dernier cas, il s'agit d'atomes qui, pris à l'état libre ou sortant d'autres combinaisons, s'unissent pour former de nouvelles molécules, tandis que dans le cas des corps radioactifs, il s'agit au contraire d'électrons provenant d'atomes instables, qui s'unissent pour former des atomes nouveaux, plus durables.

Certaines expériences et spécialement celles de Rutherford et de ses collaborateurs, rendent extrêmement vraisemblables ces modifications ou transformations atomiques, et conduisent à considérer les phénomènes de la radioactivité de la manière suivante [2].

Les atomes des corps radioactifs sont des systèmes d'électrons instables. Ces atomes se divisent

(1) Elster et H. Geitel. — *Beiblätter*, p. 443 (1899).

(2) E. Rutherford et F. Soddy. — *Phil. Mag.*, p. 576, Mai (1903).

l'un après l'autre en plusieurs parties, c'est-à-dire en électrons négatifs libres et en groupes d'électrons en majorité positifs, ou ions positifs. Les premiers constituent les rayons β et les autres les rayons α.

L'émanation est probablement constituée par ces mêmes ions positifs ou par des modifications de ces ions. Si une partie seulement des atomes désagrégés est rayonnée tout autour, la partie restante constituera un nouveau corps qui pourra être lui-même radioactif; et s'il l'est, ses atomes seront capables de fractionnements ultérieurs.

On pourrait en dire autant des nouveaux atomes constituant l'émanation, ainsi que de la substance qu'elle dépose sur les corps inertes en les rendant temporairement actifs (activité induite). Les transformations atomiques finiront de se produire seulement lorsque les électrons constitueront des atomes stables et, par suite, une substance non radioactive.

Considérons, par exemple, l'uranium, M. Crookes [1] et M. Becquerel [2] séparèrent de cette substance une partie active et une partie non active. La première que Rutherford appela l'uranium X, perd avec le temps son activité, pendant que l'autre l'acquiert lentement. L'uranium non actif se transforme donc peu à peu en uranium X, et la transformation est accompagnée de radiation. En même temps l'uranium X se transforme en une substance inconnue. La même chose se passe avec le thorium, à cela près que, outre une transformation de thorium inactif en thorium X, accompagnée de l'émission des rayons habituels, on a en plus la production d'une émanation, comme résultat d'une scission ultérieure des

(1) W. Crookes. — *Proc. Roy. Soc.*, t. LXVI, p. 419 (1900).
(2) H. Becquerel. — *Comptes rendus*, t. CXXXVI, p. 137 (1900).

atomes constituant le thorium X. L'émanation est elle-même radioactive, et apte ainsi à se transformer en d'autres substances, parmi lesquelles celles qui adhèrent aux corps voisins et sont cause de la radioactivité induite.

On ignore également quelle est la condition atomique finale et stable du thorium.

Les transformations successives de l'atome de radium sont analogues à celles du thorium, sauf qu'il n'existe pas, à ce qu'il semble, un radium X. Il y a donc scission des atomes de radium et formation d'émanation ou peut-être mieux d'émanations, car entre le radium et l'émanation condensable il existe, semble-t-il, des phases de transformations intermédiaires, ces transformations étant contemporaines de l'émission des rayons α, β, γ. L'émanation est elle-même radioactive, et en se transformant elle produit la substance produisant la radioactivité induite, à savoir, une substance temporairement radioactive et à cause de celà, en état de transformation ultérieure. On ne peut dire, pas plus pour le radium que pour les autres corps radioactifs, que les autres phases successives d'agrégation existent avant d'arriver à un arrangement stable ; mais cette substance finale non radioactive peut désormais être considérée comme connue dans le cas du radium. On a, en effet pu reconnaître [1], qu'avec le temps, l'émanation du radium enfermée dans un tube se modifie ; son spectre change d'aspect lentement, et finit par présenter les raies caractéristiques de l'*hélium*. Ce gaz, découvert depuis peu de temps dans notre atmos-

---

[1] E. Rutherford et F. Soddy. — *Phil. Mag.*, p. 441, avril (1903).
W. Ramsay. — *Nature*, p. 354, août (1903).
W. Ramsay et F. Soddy. — *Phys. Zeitschr.*, p. 615, septembre (1903).

phère et dans quelques minéraux, est un de ceux dont les raies se rencontrent dans le spectre de la lumière solaire, à laquelle il doit, d'ailleurs, son nom. Les minéraux dont il fut extrait, sont en général ceux-là mêmes dont on retire le radium ; ce qui est facilement explicable d'après ce qui a été exposé.

Une expérience toute récente de MM. Curie et Dewar [1] semble mettre hors de doute la transformation de l'émanation du radium en hélium. Ils employèrent environ 4 décigr. de bromure de radium pur et sec enfermé depuis trois mois dans une petite ampoule communiquant avec un tube de Geissler, c'est-à-dire avec un tube muni de deux électrodes soudées à travers le verre, par l'intermédiaire desquelles on pouvait rendre lumineux le gaz contenu dans le tube en faisant passer des décharges électriques. On fit d'abord un vide suffisant dans ces récipients et l'on reconnut qu'il se dégageait continuellement du corps radioactif un gaz, à raison de 1 cm c. chaque mois (à la pression ordinaire). En faisant passer la décharge dans le tube et en examinant le spectre de la lumière ainsi produite, on voyait les raies de l'hydrogène et celles du mercure, la vapeur de ce dernier provenant de la pompe avec laquelle on avait fait le vide. Il n'y avait donc pas encore de trace d'hélium.

Le même bromure de radium fut ensuite introduit dans un tube en quartz, et chauffé jusqu'à la fusion du sel, pendant que l'on produisait une aspiration à travers un tube refroidi par de l'air liquide. On recueillit ainsi 2, 6 cm c. de gaz qui était lumineux par suite de l'émanation qu'il contenait. Transporté

---

(1) Dewar et Curie. — *Comptes rendus*, p. 19, 25 janv. 1904.

dans un tube de Geissler, ce gaz ne montra que le spectre de l'azote, même après avoir essayé de l'éliminer au moyen de la condensation provoquée avec le refroidissement dans l'hydrogène liquide. Arrivé à ce point, le tube de quartz contenant le sel de radium fut fermé hermétiquement pendant que l'on faisait le vide. Vingt jours plus tard, en entourant le tube de bandelettes d'étain formant électrodes et en rendant le gaz lumineux par la décharge, le spectroscope montra nettement le spectre entier de l'hélium.

Il semble difficile, après cela, de mettre en doute que l'hélium se forme à la suite des transformations radioactives du radium, mais il faudra beaucoup d'autres preuves de ce genre avant qu'on puisse considérer la transformation des atomes chimiques comme bien démontrée, c'est-à-dire avant qu'on abandonne l'idée de l'invariabilité absolue des atomes qui, avec le temps, s'est profondément enracinée en nous [1].

---

[1] *Sur la radioactivité induite du radium.*—MM. Rutherford et Soddy ont, dès le, début admis que les émanations et les radioactivités induites sont constituées par des particules matérielles provenant de la désagrégation des corps radioactifs. La condensation de l'émanation aux températures très basses, les récentes découvertes de MM. Ramsay et Soddy relatives à la pression de l'émanation du radium et à la production de l'hélium par le radium ont apporté un appui considérable à l'hypothèse de la désagrégation : le radium émet donc une émanation gazeuse, matérielle et rétroactive qui se désagrège à son tour en donnant des matières radioactives solides auxquelles sont dus les phénomènes de la radioactivité induite.

La loi de désagrégation de l'émanation M du radium en fonction du temps t est une loi ponentielle de la forme

$$M = M_0 e^{-mt}$$

ou

$$m = 2{,}012 \times 10^{-6}$$

d'après cette loi l'émanation diminue de moitié en 4 jours.

La quantité $\frac{1}{m}$ représente la vie moyenne de l'émanation ; elle est de 5,75 jours.

Enfin tout récemment (Société française de physique, 17 mars 1905) M. P. Curie, en collaboration avec M. J. Danne, a étudié les lois de la disparition de la radioactivité induite par l'émanation du radium.

On commence pac laisser un corps solide à s'activer pendant longtemps en présence de l'émanation du radium et l'on étudie ensuite la manière dont il se désactive à l'air libre. Voici la loi trouvée (en négligeant ce qui se passe pendant les premières 5 minutes);

$$(1) \qquad I = I_0 \left[K e^{-ct} - (K-1) e^{-bt} \right]$$

avec

$$K = 4{,}5$$
$$c = 0.000413$$
$$b = 0.000538$$

I_0 étant le rayonnement initial et t étant exprimé en secondes.

Comment interpréter cette loi? Eh bien, l'on admet que pendant tout le temps que l'émanation agit sur le corps solide soumis à l'expérience, elle crée, avec une vitesse constante une première substance radioactive B qui se désagrège spontanément suivant la loi exponentielle

$$B = B_0 e^{-bt}$$

avec une vitesse

$$\frac{dB}{dt} = -bB$$

b étant un coefficient caractérisant la vitesse de désagrégation de la substance.

La substance B en se désagrégeant donne naissance à son tour à une deuxième substance radioactive C qui disparaîtrait suivant une loi exponentielle de la forme

$$C = C_0 e^{-ct}$$

si elle n'était entretenue par la substance B.

Soustrayons maintenant le corps solide à l'action de l'émanation. Les substances B et C existeront à sa surface dans une certaine proportion qui varie en fonction du temps.

Il suffit ensuite d'admettre que le rayonnement de la substance C pendant sa désagrégation est plus important que celui de la quantité correspondante de la substance B pour trouver que le rayonnement du corps solide soumis à l'expérience est représenté par une formule de la forme (1).

Nous avons supposé que le rayonnement de C est de beaucoup le plus important, le rayonnement de B pouvant être considéré comme nul. Que donne la théorie avec cette hypothèse? Elle conduit à la valeur suivante de K

$$K = \frac{b}{b-c} = \frac{0.000413}{0.000538 - 0.000413} = 4{,}3$$

or l'expérience donne $K = 4{,}2$. On peut donc admettre que la substance C rayonne seule.

Il y a encore un cas intéressant à considérer : c'est le cas où le corps solide n'a été soumis à l'action de l'émanation que pendant *un temps relativement court*. Ici la loi de désactivation est beaucoup plus complexe que dans le cas précédent. Voici, en effet, ce que l'on constate. Le corps ayant été soumis à l'action de l'émanation du radium pendant

5 minutes seulement, le rayonnement pendant sa désactivation commence d'abord par décroître très rapidement en passant, après quelques minutes, par un minimum ; le rayonnement se met ensuite à *augmenter* et passe, au bout d'une demi-heure, par un maximum qui est finalement suivi par une décroissance exponentielle avec le coefficient $c = 0{,}000413$. Comment expliquer ces phénomènes complexes ? L'hypothèse de deux substances n'est plus suffisante. On parvient, au contraire, à tout expliquer en admettant l'existence de trois substances radioactives A, B, C sur le corps soumis au rayonnement du radium. Ces trois substances sont caractérisées par les lois de désagrégation suivantes :

$$A = A_0 e^{-at}$$
$$B = B_0 e^{-bt}$$
$$C = C_0 e^{-ct}$$

avec

$$a = 0{,}00401$$
$$b = 0{,}000538$$
$$c = 0{,}000413.$$

La substance A est créée directement par l'émanation du radium ; elle disparaît rapidement ; sa vie moyenne est $\frac{1}{m} = 4{,}3$ minutes. En se désagrégeant, cette substance A donne naissance à la substance B qui, lorsqu'elle est seule, se détruit spontanément au bout de 33 minutes (sa vie moyenne). La substance C est entretenue par B ; sa vie moyenne est de 39 minutes.

Les substances A et C rayonnent et ionisent l'air ; B ne rayonne pas.

D'une manière générale, lorsqu'un corps a été soumis pendant un temps θ à l'action de l'émanation du radium, et qu'il se désactive ensuite à l'air libre, son rayonnement est donné, en fonction du temps, par la formule :

$$I = I_1\left[\lambda\left(1 - e^{-a\theta}\right)e^{-at} - \frac{c}{b-c}\,\frac{a}{a-b}\left(1 - e^{-b\theta}\right)e^{-bt} + \frac{b}{b-c}\,\frac{a}{a-c}\left(1 - e^{-c\theta}\right)e^{-ct}\right],$$

où $\lambda = 1{,}28$

$$a = 0.00401$$
$$b = 0.000538$$
$$c = 0.000413.$$

La radioactivité induite devient volatile aux températures élevées et distille d'un corps chaud sur un corps froid. La substance B est plus volatile que la substance C.

Enfin lorsqu'on chauffe un instant un corps activé à une température supérieure à 900°, la nature de la radioactivité induite semble modifiée et la constante de temps de la loi de la disparition de la radioactivité induite n'est plus la même qu'avant. M. Curie voit là un fait entièrement nouveau.

[E. N.]

CHAPITRE VI

MASSE, VITESSE ET CHARGE ÉLECTRIQUE DES IONS ET DES ÉLECTRONS

Le moment est venu maintenant de donner une idée des méthodes qui ont permis de mesurer le rapport entre la charge électrique et la masse des électrons ou des ions, ainsi que les valeurs séparées de ces deux quantités, et la vitesse avec laquelle se meuvent ces ions et ces électrons dans les différents cas. Ces méthodes sont principalement basées sur les effets produits par le champ électrique ou par le champ magnétique, ensemble ou séparément, sur les particules électrisées en mouvement, ou bien sur la chaleur dégagée par suite des chocs de ces mêmes particules contre un obstacle, ou enfin sur la propriété qu'elles possèdent de faire office de noyau dans la condensation des vapeurs. Sans entrer dans les détails de ces expériences et des calculs, nous nous proposons d'examiner brièvement ces phénomènes.

Considérons d'abord l'effet produit par le champ magnétique sur les rayons cathodiques. Supposons qu'un mince faisceau de ces rayons, susceptible de rendre lumineuse la paroi opposée à la cathode, soit dirigé perpendiculairement aux lignes de force magnétique ; il suffira pour cela de placer le tube producteur de rayons cathodiques entre les pôles d'un

aimant. Les électrons en mouvement constituant les rayons cathodiques, dévieront de leur chemin rectiligne, et suivront une trajectoire en forme d'arc de circonférence. En effet, le champ magnétique fait naître une force électromagnétique appliquée à l'électron en mouvement et de même sens que celle qu'il produirait sur un courant électrique dirigé suivant sa trajectoire. Cette force sera donc perpendiculaire à la fois à la trajectoire de l'électron et à la force magnétique ; elle n'influera pas par suite sur la vitesse de l'électron, mais elle aura une influence sur la direction de son mouvement qui deviendra circulaire et uniforme. La force électromagnétique sera alors égale et contraire à la force centrifuge du dit mouvement circulaire. Or, la force centrifuge de l'électron dépend d'une manière simple et connue de sa masse, de sa vitesse et du rayon de sa trajectoire ; d'autre part, la force électromagnétique est proportionnelle à la charge de l'électron et à sa vitesse, car le produit de ces deux facteurs sert à représenter l'intensité du courant électrique équivalent. On arrive donc ainsi à une relation simple entre les qualités suivantes : 1° Charge et masse de l'électron, ou plus exactement rapport de l'une à l'autre; 2° vitesse de l'électron; 3° Intensité du champ magnétique; 4° Rayon de l'arc de circonférence parcouru [1]. Les deux dernières quantités peuvent être mesurées et il suffit

---

[1]. — Si e est la charge d'une particule, m sa masse, v sa vitesse, H l'intensité du champ magnétique, et ρ le rayon de la trajectoire, la relation qui existe entre ces quantités est exprimé par :

$$v = H\rho \frac{e}{m}.$$

de connaître l'une des deux premières pour être en mesure de calculer l'autre.

Si l'on suppose maintenant, comme on le supposa tout d'abord, que la vitesse de l'électron dans les rayons cathodiques, est de l'ordre de grandeur de la vitesse moléculaire des gaz, l'on trouve pour le rapport entre sa charge et sa masse une valeur de grandeur comparable à celle qui correspond aux ions électrolytiques. On serait ainsi conduit à supposer que la masse des électrons est de l'ordre de grandeur de celle des atomes matériels. Heureusement, l'on comprit vite que cette supposition n'était pas exacte, et l'on essaya d'arriver à la détermination simultanée des deux premières quantités précédentes, en recourant, outre la déviation magnétique des rayons cathodiques, à d'autres effets et d'autres considérations. On peut, par exemple, admettre, que la vitesse de l'électron a pour valeur celle pour laquelle son énergie cinétique équivaut au travail électrique correspondant au passage de la charge de l'électron du potentiel de la cathode à celui de l'anode. Une pareille méthode a été employée par MM. W. Kaufmann [1], et S. Simon [2].

M. J.-J. Thomson [3] détermine la vitesse des électrons en mesurant la charge négative abandonnée par ces derniers en pénétrant, après avoir subi la déviation produite par le champ magnétique, dans un conducteur creux relié à un électromètre, et en mesurant en même temps, au moyen d'un couple thermoélectrique, l'énergie transportée par les électrons. A la relation existant entre les quantités

---

(1). W. Kaufmann. — *Wied. Ann.*, t. LXI, p. 544; T. t. LXII, p. 596, t. LXII, p. 431. (1898).

(2). S. Simon. — *Wied. Ann.*, t. LXIX, p. 589, (1899).

(3). J.-J. Thomson. — *Mag. Phil.*, t. XLIV, p. 293 (1897).

ci-dessus énumérées, s'en ajoutent ainsi deux autres [1].

La première exprime que la charge électrique transportée sur le conducteur (et qu'on peut mesurer) est égale au produit du nombre d'électrons par la charge constante de chacun d'eux ; la seconde relation exprime que l'énergie transportée est, par suite des chocs, transformée en chaleur (cette dernière étant mesurée au moyen du couple thermoélectrique) est égale au produit du nombre d'électrons par l'énergie cinétique de chacun d'eux, laquelle n'est autre que la moitié du produit de la masse par le carré de la vitesse.

Aux deux inconnues précédentes s'en est donc ajoutée une nouvelle, qui est le nombre d'électrons ayant pris part au mouvement pendant la durée de l'expérience; mais comme l'on dispose maintenant de trois relations au lieu d'une seule, en éliminant le nombre d'électrons dont nous venons de parler, on arrive facilement à calculer le rapport entre la charge et la masse de chacun de ces électrons ainsi que leur vitesse [2].

---

(1). — Voici ces deux relations :

$$Q = Ne, \qquad W = \frac{1}{2} mV^2N$$

où Q est la quantité totale d'électricité transportée, N le nombre d'électrons, et W, leur énergie cinétique.

(2) L'élimination de N entre les trois équations conduit aux deux relations suivantes :

$$v = \frac{2W}{QH\rho},$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2W}{QH^2\rho^2}$$

qui servent à calculer v et $\frac{e}{m}$.

Cette méthode donna les premiers résultats dignes de confiance. En changeant le gaz raréfié dans lequel prenaient naissance les rayons cathodiques, (air, hydrogène, anydride carbonique), on obtint pour le rapport entre la charge et la masse des électrons, des nombres très peu différents. Dans chaque cas, la valeur trouvée indiquait clairement que si chaque électron possède une charge électrique égale à celle d'un ion d'hydrogène, sa masse est, au contraire, de beaucoup inférieure à celle d'un ion d'hydrogène. Quant à la valeur trouvée pour la vitesse des

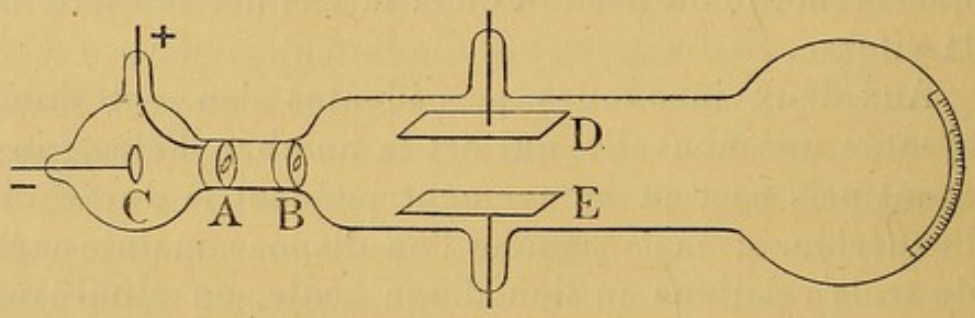

Fig. 16

électrons, elle est de beaucoup supérieure à la vitesse moléculaire des gaz : elle atteignait environ un dixième de celle de la lumière.

On doit encore à J.-J. Thomson [1] une autre méthode pour déterminer la vitesse des électrons constituant les rayons cathodiques, méthode basée sur la déviation de ces rayons produite par un champ électrique.

Considérons les rayons cathodiques émanés de l'électrode C (fig. 16), réduits à un mince faisceau au moyen de deux épais diaphragmes métalliques A, B, reliés au sol et munis d'étroites fentes horizontales ; si l'on dispose sur le trajet de ce faisceau

[1] J.-J. Thomson. — *Phil. Mag.*, t. XLIV, p. 293 (1897).

deux plaques métalliques D, E, chargées d'électricités opposées, les rayons cathodiques seront après leur passage entre ces plaques, déviés de leur chemin rectiligne, car les électrons négatifs qui les constituent seront attirés par la plaque positive et repoussés par l'autre plaque. Cette déviation, déjà prévue, n'avait pas été obtenue par Hertz, et J.-J. Thomson ne l'obtint non plus au début de ses recherches. Cela tient à la conductibilité acquise par le gaz raréfié par suite du passage des rayons cathodiques, conductibilité qui empêche de maintenir entre les deux plaques une différence de potentiel suffisante.

Mais il suffit de pousser à la limite la raréfaction du gaz pour obtenir l'effet attendu, et voir ainsi la tache lumineuse due à la phosphorescence excitée par les rayons cathodiques se déplacer sur la paroi du tube opposée à la cathode. C'est ainsi que lorsque la plaque E est positive et la plaque D négative, l'on constate que la tache lumineuse se déplace vers le bas, ce qui démontre que la trajectoire des électrons s'est courbée dans cette direction.

En vérité, par suite de la force électrique, qu'on peut supposer constante entre les deux plaques si ces dernières sont suffisamment grandes et rapprochées, chaque électron décrira une parabole, et les rayons cathodiques prendront ainsi la forme présentée par un jet d'eau jaillissant d'un tube horizontal et soumis à l'effet de la pesanteur.

Dans le cas de la pesanteur, la force est proportionnelle à la masse du corps en mouvement, et l'accélération est indépendante de cette masse. Ici, la force qui agit sur un électron ainsi que l'accélération qu'elle produit, sont proportionnelles à la

charge électrique ; et comme à égalité de charge, et par suite à égalité de force électrique, l'accélération est en raison inverse de la masse, on peut donc dire que l'accélération dont dépend ensuite, d'une manière connue, la parabole décrite, est proportionnelle au rapport entre la charge et la masse de l'électron. On a donc ainsi, comme dans le cas de la déviation magnétique, une relation qui contient le dit rapport et la vitesse initiale de l'électron. Si on fait agir simultanément le champ électrique et le champ magnétique, les lignes de force de ce dernier étant supposées perpendiculaires en même temps aux lignes de force électrique et à la direction des rayons cathodiques, on aura un moyen de calculer le rapport de la charge à la masse de chaque électron et la vitesse de ces derniers. On peut encore faire en sorte que les effets dus aux deux champs se compensent. On n'aura ensuite qu'à mesurer la déviation produite quand un seul de ces champs agit et l'intensité de chacun, pour en déduire les deux quantités cherchées [1]. J-J. Thomson obtint ainsi comme vitesse des électrons, une vitesse de l'ordre du dixième de celle de la lumière, et comme valeur du rapport entre la charge et la masse d'un électron, une valeur s'écartant peu de celle trouvée par d'autres méthodes.

---

[1] Soit θ la déviation produite séparément, tant par le champ électrique que par le champ magnétique, l la longueur du trajet pendant lequel l'électron est exposé aux causes déviatrices, F l'intensité du champ électrique.

L'on aura :

$$V = \frac{F}{H}.$$

$$\frac{e}{m} = \frac{F\theta}{H^2 l}$$

Des mesures analogues furent faites par H.-A. Wilson [1] en employant des cathodes constituées par de différents métaux; il constata que la nature du métal constituant la cathode n'influait pas sur les résultats obtenus.

La méthode de J.-J. Thomson fut également employée, et presqu'en même temps, par P. Lenard [2], qui opéra sur les rayons portant son nom, c'est-à-dire sur des rayons cathodiques ayant traversé une feuille d'aluminium à leur sortie du tube dans lequel ils prennent naissance.

Ce même physicien [3] appliqua en outre une nou-

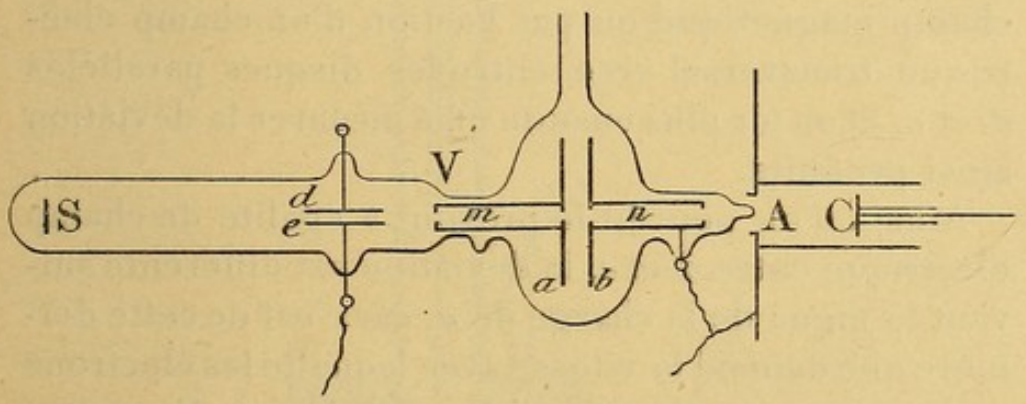

Fig. 17

velle méthode consistant à soumettre les électrons à l'action d'un champ électrique parallèle à la direction de leur mouvement. A cette effet, des rayons de Lenard engendrés par la cathode C (fig. 17) sortaient par une ouverure A recouverte d'une feuille d'aluminium, et pénétraient dans l'appareil V contenant un gaz extrêmement raréfié.

Dans cet appareil se trouvait un condensateur formé de deux disques métalliques parallèles *a* et *b*, ayant

(1) H.-A. Wilson. — *Proc. Camb. Phil. Soc.*, p. 179 (1901).
(2) P. Lenard. — *Wied. Ann.*, t. LXV, p. 279 (1898).
(3) P. Lenard. — *Wied. Ann.*, t. LXV. p. 504 (1898).

au centre une petite ouverture à travers laquelle passent les rayons provenant de A et se dirigeant vers l'écran phosphorescent S. Deux tubes métalliques *m*, *n* préservent les rayons des actions électriques pouvant provenir du disque *a*, qui peut être isolé et électrisé, tandis que *b* est toujours en communication avec le sol. C'est seulement pendant leur passage entre *a* et *b* que les électrons sont exposés à la force électrique qui en augmente ou en diminue la vitesse, suivant que le disque *a* est électrisé positivement ou négativement. Ces mêmes rayons sont, d'autre part, déviés, comme dans la méthode précédente, par l'action d'un champ magnétique ou par l'action d'un champ électrique transversal créé entre les disques parallèles *d* et *e*, et on n'a plus ensuite qu'à mesurer la déviation ainsi produite.

Ainsi qu'on pouvait le prévoir, à égalité de champ électrique entre *d* et *e*, la déviation est différente suivant le signe de la charge de *a*, car c'est de cette dernière que dépend la vitesse avec laquelle les électrons arrivent dans le champ qui les fait dévier. En mesurant cette déviation et l'intensité des deux champs, on peut calculer le rapport considéré ; nous donnerons plus loin la valeur obtenue par Lenard en employant cette méthode.

Nous citerons encore une dernière méthode, très ingénieuse mais un peu compliquée, employée par E. Wiechert [1] pour mesurer directement et avec précision la vitesse des rayons cathodiques. En y ajoutant la déviation magnétique, il put encore calculer le rapport entre la charge et la masse de l'électron.

---

[1] E. Wiechert. — *Wied. Ann.*, t. LXIX, p. 739 (1899).

Mais ce n'est pas seulement sur les électrons constituant les rayons cathodiques, qu'on a effectué des mesures destinées à déterminer leurs constantes caractéristiques ; d'autres mesures furent faites également sur les électrons négatifs émis par les métaux

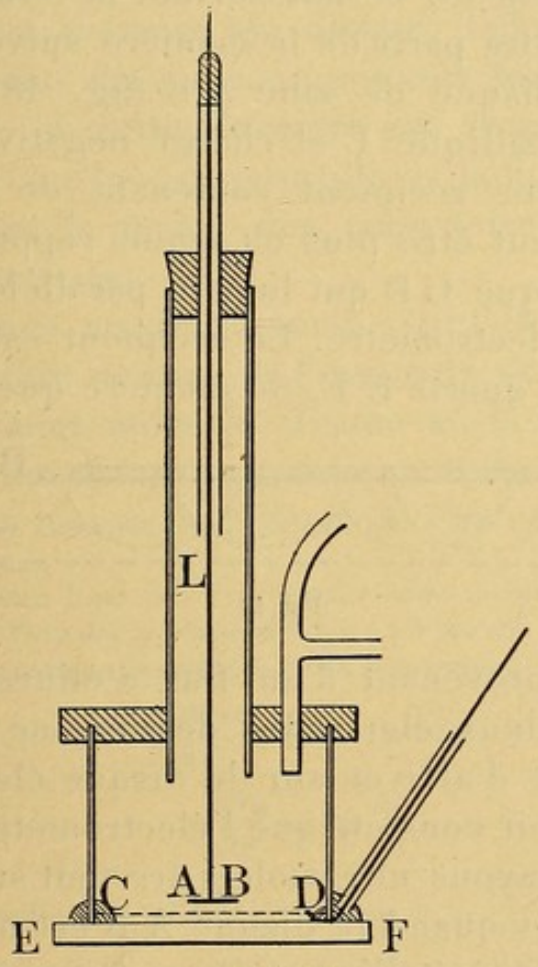

Fig. 18

soumis à l'action des rayons ultraviolets, ainsi que sur les électrons émis par les corps radioactifs.

C'est ainsi que M. J.-J. Thomson (1) fit agir un champ magnétique sur les électrons émis par un métal soumis à l'action de la lumière. M. A. Righi (2), en

(1) J.-J. Thomson. — *Phil. Mag.*, t. XLV, p. 547 (1899).
(2) A. Righi. — *Mem. della R. Acc. di Bologna* (V), p. 110 (1890).

employant un dispositif expérimental presque identique avait déjà constaté pour la première fois qu'un champ magnétique diminue le transport de l'électricité négative du corps qui reçoit les rayons ultraviolets aux corps voisins. M. J.-J. Thomson donna l'interprétation de ce fait suivant la nouvelle théorie, et il en tira parti de la manière suivante.

Un petit disque de zinc A B (fig. 18) porté par une tige métallique L et chargé négativement, est placé dans un récipient contenant de l'air assez raréfié, et peut être plus ou moins rapproché d'une toile métallique C D qui lui est parallèle et qui est reliée à un électromètre. Le récipient est fermé par une lame de quartz E F, de manière que les rayons

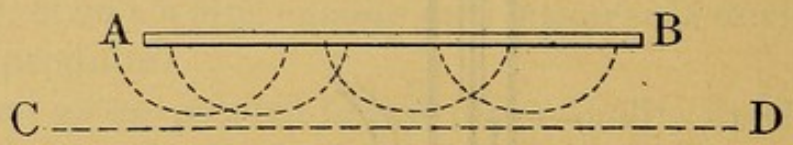

Fig. 19

ultraviolets provenant d'un flux d'étincelles jaillissant entre deux électrodes de zinc, ne soient pas arrêtés avant d'arriver sur le disque électrisé A B. Si, après avoir constaté que l'électromètre se charge lorsque les rayons ultraviolets arrivent sur le disque et cela même quand le disque A B est un peu éloigné de la toile métallique C D, on fait agir un champ magnétique dont les lignes de force sont parallèles au disque et à la toile métallique, l'on vérifie, qu'en dépassant une certaine distance entre le disque et la toile, le phénomème du transport de l'électricité négative de A B sur C D cesse presque complètement. Le mécanisme de ce phénomène est le suivant.

En l'absence du champ magnétique, les électrons

négatifs, que les radiations chassent du disque de zinc A B (fig. 19), vont directement de A B sur C D ; mais si l'on fait agir un champ magnétique perpendiculairement au plan de la figure, chaque électron émis par le disque A B parcourt une courbe, qu'on démontre être une cycloïde ; de sorte que, arrivé à une certaine distance du disque, l'électron revient vers ce même disque sans pouvoir toucher la toile métallique, si cette dernière est trop éloignée [1]. Les lignes courbes en pointillé de la figure ci-contre représentent la forme des trajectoires parcourues par les électrons.

La distance maxima franchie par l'électron dépend d'une manière connue de l'intensité du champ électrique régnant entre le disque et la toile C D, de l'intensité du champ magnétique et du rapport de la charge à la masse de l'électron. Par conséquent, en

---

[1] En prenant l'axe des x perpendiculaire au disque et à la toile métallique, et l'axe des y perpendiculaire à l'axe des x et à la direction du champ magnétique, les équations du mouvement de l'électron sont,

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = Fe - He\frac{dy}{dt},$$

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = He\frac{dx}{dt};$$

en supposant nulles les valeurs initiales de x, y, $\frac{dx}{dt}$, $\frac{dy}{dt}$, la solution de ces équations s'écrit, en posant pour plus de simplicité,

$$a = \frac{Fm}{H^2e}, \qquad b = H\frac{e}{m}$$

$$x = a(1 - \cos bt),$$

$$y = a(bt - \sin bt).$$

Le rayon du cercle générateur de la cycloïde est a, et par suite, la distance maxima comptée à partir du disque AB, jusqu'à laquelle un électron peut arriver, est,

$$\frac{2Fm}{H^2e}$$

mesurant les deux premières quantités ainsi que la distance maxima entre le disque et la toile métallique au-delà de laquelle cette dernière ne reçoit plus de charge sensible, on a un moyen de déterminer le rapport ci-dessus considéré. L'exactitude de la détermination est limitée par la circonstance, que les électrons ne partent pas tous du disque A B avec la même vitesse ; par suite, la distance maxima à laquelle ils arrivent n'est pas la même pour tous les électrons.

Une méthode analogue fut appliquée par M J.-J. Thomson (1) aux électrons émis par un métal incandescent.

M. P. Lenard (2) mesura de son côté le même rapport en utilisant à l'action des rayons ultraviolets sur les métaux dans le vide ; enfin, M. H. Becquerel (3) et d'autres expérimentateurs déterminèrent la même constante pour les électrons émis par les corps radioactifs. Sans entrer, pour le moment, dans le détail de ces dernières déterminations, et d'autres encore qui donnèrent des résultats analogues, nous allons disposer les principales valeurs de ce rapport entre la charge et la masse d'un électron sous forme de tableau synoptique (4) (page ci-contre).

Si l'on tient compte de la grande variété des phé-

---

(1) J.-J. Thomson. — *Phil. Mag.*, t. XLVIII, p. 547 (1899).

(2) P. Lenard. — *Drude's Ann.*, t. II, p. 359, (1900).

(3) H. Becquerel. — *Rapports du Congrès de Physique de Paris*, t. III, p. 47.

(4) Les valeurs numériques de ce tableau sont écrites dans le système de numération décimale, c'est-à-dire que 231×10^{15} veut dire

231.000.000.000.000.000.

L'unité de mesure adoptée pour la charge est l'unité électrostatique, à savoir, la quantité d'électricité qui repousse une quantité d'électricité égale et de même signe se trouvant à un centimètre de distance de la première, avec une force égale à une dyne.

SOURCE D'ÉLECTRONS	EXPÉRIMENTATEURS	DATE	MÉTHODE ADOPTÉE	Rapport de la charge à la masse $\frac{e}{m}$
Rayons cathodiques	J.-J. THOMSON	1897	Déviation électrique et déviation magnétique.	231×10^{15}
»	»	»	Déviation magnétique, charge transportée et chaleur dégagée.	351×10^{15}
»	KAUFMANN	1897 1898	Déviation magnétique et différence de potentiel.	558×10^{15}
Rayons de Lenard	P. LENARD	1898	Déviation électrique et déviation magnétique.	$191,7 \times 10^{15}$
»	»	»	Déviation et champ électrique.	204×10^{15}
Rayons cathodiques	SIMON	1899	Déviation magnétique et différence de potentiel.	$559,5 \times 10^{15}$
»	WIECHERT	»	Déviation magnétique et vitesse.	$\left.\begin{matrix}303\\465\end{matrix}\right\} 10^{15}$
Rayons ultra-violets	J.-J. THOMSON	»	Diminution de la décharge par l'action du champ magnétique.	228×10^{15}
Métal incandescent	»	»	d°	261×10^{15}
Rayons ultra-violets	P. LENARD	1900	Déviation magnétique et champ électrique.	345×10^{15}
Rayons β du radium	H. BECQUEREL	»	Déviation électrique et déviation magnétique.	environ 300×10^{15}

nomènes dans lesquels se manifestent les électrons négatifs et de la diversité des méthodes employées pour la mesure du rapport de la charge à la masse de chacun, les résultats indiqués dans ce tableau paraissent suffisamment concordants. Il ne reste plus aucun doute, en effet, sur l'ordre de grandeur de ce rapport, puisqu'il est de 663 à 1.937 fois plus grand que le même rapport correspondant à l'ion électrolytique d'hydrogène, ce dernier ayant pour valeur $0,289 \times 10^{15}$; ce rapport est donc bien plus grand encore si on le compare à ceux qui correspondent aux ions des autres corps. Les particules constituant les rayons cathodiques et les rayons β des corps radioactifs, ne peuvent donc être des atomes, mais doivent être des particules ayant une masse beaucoup plus petite que les atomes.

C'est ainsi qu'avec des méthodes purement physiques on a démontré de la manière la plus certaine l'existence de masses beaucoup plus petites que celle du plus petit des atomes des substances connues.

Les différences trouvées par les différents expérimentateurs pour la valeur du rapport entre la charge et la masse des électrons ne proviennent pas seulement des erreurs de mesure, puisque des expériences assez précises, effectuées par M. Kaufmann [1], ont démontré que ce rapport varie avec la vitesse des électrons, diminuant rapidement lorsque cette vitesse se rapproche sensiblement de celle de la lumière. Ce physicien fait agir sur les rayons émis par un sel de radium, un champ magnétique et un champ électrique, ayant une même direction perpendiculaire à

---

[1] W. Kaufmann. — *Gött. Nachr.*, 8 novembre (1901); 26 juillet (1902); 7 mars (1903).

celle de ces rayons. Ceux-ci, par suite de l'action de la force magnétique, dévient dans une certaine direction, et ils dévient dans une direction perpendiculaire à cette dernière par l'action de la force électrique; de sorte que cette disposition expérimentale est analogue à celle bien connue des prismes croisés, dans laquelle les deux prismes impriment aux rayons lumineux deux déviations successives et à angle droit entre elles. De même que, dans cette expérience, chaque rayon coloré, séparé de la lumière blanche par l'action du premier prisme, subit une nouvelle déviation par le second prisme, et que toutes ces déviations peuvent être mesurées séparément, l'on peut également, dans les expériences de Kaufmann, mesurer les déviations subies par chacun de ces rayons β, qui diffèrent les uns des autres par les diverses valeurs de la vitesse des électrons qui les constituent.

Cette méthode a permis à M. Kaufmann de trouver, pour le rapport de la charge à la masse des électrons, certaines valeurs assez rapprochées de celles obtenues par les autres expérimentateurs, tant qu'il s'agissait d'électrons doués de vitesse relativement modérée, c'est-à-dire d'électrons constituant les rayons β peu pénétrants; tandis que pour les rayons plus pénétrants il trouva des valeurs plus petites; ce rapport se réduit à la moitié de sa valeur ordinaire pour les électrons dont la vitesse est environ les neuf dixièmes de la vitesse de la lumière.

Or, comme tout porte à croire que la charge est toujours la même pour tous les électrons, il est nécessaire de supposer que c'est leur masse qui n'est pas constante, et qu'elle croît rapidement avec leur

vitesse, quand celle-ci est voisine de la vitesse de la lumière.

Ce résultat a une grande importance, puisqu'il est conforme à l'hypothèse suivant laquelle les électrons ne possèdent pas de masse matérielle dans le sens ordinaire du mot, mais seulement une *masse apparente* due à leur nature de charge électrique en mouvement. Nous y reviendrons d'ailleurs dans le dernier chapitre.

Des mesures analogues à celles instituées sur les électrons négatifs furent effectuées par M. W. Wien [1] et par M. J.-J. Thomson [2] sur les ions positifs constituant les rayons-canaux (kanalstrahlen de Goldstein). Le premier de ces physiciens obtint comme résultat une vitesse de 3.600 km. et une valeur de $0{,}009 \times 10^{15}$ pour le rapport de la charge de ces électrons à leur masse.

M. J.-J. Thomson trouva 0.012×10^{15} pour ce même rapport.

Il est donc hors de doute que les parcelles positives des rayons-canaux ne sont pas des électrons mais bien des atomes et peut-être même de gros groupes atomiques électrisés.

La conclusion précédente relative à la faible masse des électrons est basée sur l'hypothèse que la charge électrique des ions dans les gaz est égale à celle qui est associée à chaque ion électrolytique (ou mieux à chaque valence d'un ion). Cette hypothèse peut désormais être considérée comme vérifiée.

L'étude de la diffusion des ions dans les gaz [3]

---

(1) W. Wien. — *Wied. Ann.* t. LXV, p. 440 (1898).

(2) J.-J. Thomson. — *Conduction of Electricity trough Gases.* University Press, Cambridge (1903).

(3) J.-S. Townsend. — *Phil. Trans.*, p. 259 (1900).

a, en effet, conduit à cette conclusion importante que la charge électrique de chaque ion est sensiblement égale à celle qu'ont les ions dans l'électrolyse. Mais avant qu'on arrivât à ce résultat, M. J.-J. Thomson [1] avait mesuré directement la charge de chaque ion dans un gaz par une méthode vraiment géniale, dont nous allons essayer de donner une idée.

Lorsque l'air saturé de vapeur se détend brusquement, une partie de cette vapeur se condense en brouillard par suite du refroidissement qui accompagne la détente, et chaque gouttelette a généralement comme noyau une parcelle de la poussière en suspension dans l'atmosphère. Il semble, en effet, que la condensation de la vapeur nécessite la présence de corps très petits, et qu'elle commence à se produire précisément à leur surface, dont le rayon de courbure est certainement très petit ; quoiqu'il en soit, il est certain que la présence de ces corpuscules active et favorise la liquéfaction de la vapeur. Si, en effet, la poussière est éliminée avec soin, la formation du brouillard nécessite une détente de l'air humide plus forte que celle nécessitée dans le premier cas.

M. C.-T.-R. Wilson [2] a, d'autre part, démontré qu'un gaz contenant des ions se comporte comme de l'air contenant des poussières, de sorte que les ions eux-mêmes fonctionnent comme noyaux de condensation de la vapeur. Et, en vérité, une détente de l'air à l'état ordinaire, trop faible pour que le brouillard puisse se produire, peut devenir suffisante pour faire condenser la vapeur lorsque l'air est ionisé, au moyen d'un faisceau de rayons X, par exemple.

---

(1) J.-J. Thomson. — *Phil. Mag.*, p. 529, décembre 1898.

(2) C.-T.-R. Wilson. — *Phil. Trans.*, p. 265 (1897).

Le fait suivant confirme que c'est bien la présence d'ions qui change la manière de se comporter du gaz ; en éliminant en effet les ions au moyen d'un courant électrique traversant le gaz, on remarque immédiatement que la formation du brouillard est de nouveau retardée, et qu'elle exige de nouveau une détente plus forte.

L'appareil imaginé par M. J.-J. Thomson est quelque peu compliqué ; mais ses parties essentielles sont les suivantes : un récipient contenant de l'air humide possède à son intérieur deux conducteurs métalliques disposés l'un au-dessus de l'autre, horizontalement. Le conducteur supérieur, qui peut servir de couvercle au récipient, est généralement constitué par un disque mince d'aluminium et il est mis en communication avec le sol ; le conducteur inférieur, qui peut être constitué par la masse d'eau servant à maintenir saturé de vapeur l'air environnant, est en communication avec un électromètre. Au moment opportun, on ionise l'air en faisant entrer dans le récipient à travers la lame d'aluminium soit des rayons X, soit des rayons émis par un corps radioactif.

On peut encore introduire des ions dans le récipient en chargeant négativement le conducteur inférieur et en y dirigeant un faisceau de lumière ultraviolette. Dans ce dernier cas, le disque d'aluminium est remplacé par une toile métallique, le récipient est fermé au moyen d'une lame de quartz, et le conducteur est constitué par une plaque métallique, en zinc par exemple.

Dans une première phase de l'expérience, on mesure la quantité d'électricité qui passe pendant l'unité de temps d'un conducteur sur l'autre, c'est-à-

dire l'intensité du courant qui traverse l'air ionisé.

Cette quantité se calcule en multipliant la diminution de potentiel pendant l'unité de temps, déduite de la diminution de la déviation électrométrique, par la capacité du système formé par le condensateur inférieur et par l'électromètre. Mais, d'autre part, ce courant est dû au mouvement des ions sous l'action du champ électrique existant entre les deux disques. Et, supposant connus ce champ ainsi que le nombre d'ions existant dans l'unité de volume, la charge de chacun et la vitesse avec laquelle ils se transportent d'un disque à l'autre, cette intensité du courant peut être calculée. En égalant les deux valeurs, on obtiendra une équation contenant, outre les données numériques résultant directement des mesures, le nombre des ions, leur charge et leur vitesse (1).

Mais la vitesse des ions dans un champ électrique d'intensité donnée a été mesurée, et elle est bien connue ; pour arriver à la détermination de la charge des ions, il ne reste donc plus qu'à déterminer leur nombre par unité de volume.

Pour effectuer cette mesure, on passe à la seconde partie de l'expérience. Une détente convenable ayant déterminé la production du brouillard, il suffira

---

(1). — Soit E l'intensité du champ entre les deux disques, N le nombre des ions par cmc., v la vitesse des ions dans un champ d'intensité 1, e la charge de chacun, A la surface des disques ; l'intensité du courant allant d'un disque à l'autre aura pour valeur

$$N\,v\,E\,e\,A.$$

Soit C la capacité du disque isolé, P la diminution de son potentiel pendant l'unité de temps ; l'équation dont on parle dans le texte est

$$N\,v\,E\,e\,A = C\,P.$$

En mesurant E, A, C, P, et attribuant à v la valeur donnée par des expériences spéciales qui furent faites par Rutherford pour déterminer cette vitesse (480 cm. dans le cas des ions produits dans l'air par les rayons X), il ne reste plus comme inconnues que N et e ; N sera mesuré par la méthode décrite ci-dessus dans le texte.

ensuite de compter par un procédé quelconque les gouttelettes d'eau qui le forment pour que le but proposé soit atteint. En admettant, en effet, que chaque ion soit un noyau d'une de ces gouttelettes, le nombre de ces dernières sera égal au nombre d'ions. Pour évaluer le nombre de gouttelettes, il suffit de diviser leur masse totale par la masse de chacune d'elles. La masse totale se calcule en se basant sur la mesure de la température minima atteinte par l'air au moment de la détente et sur la température de cet air après la formation du brouillard [1]; la masse de chaque gouttelette se déduit de son diamètre, et celui-ci de la vitesse avec laquelle descend le bord supérieur du brouillard, toujours assez nettement visible.

Et il est naturel qu'il existe une relation entre le diamètre d'une sphère et la vitesse avec laquelle elle tombe. Si tous les corps tombent dans le vide avec la même vitesse, il n'en est plus de même, en effet, dans l'air dont la résistance ralentit plus ou moins leur mouvement. Dans le cas d'une sphère, ce ralentissement est d'autant plus grand qu'elle est plus petite. En effet, le poids est proportionnel au volume et par suite au cube du rayon de la sphère, alors que la résistance opposée par l'air est proportionnelle à sa surface et par suite au carré de son rayon ; donc, pour une diminution de ce dernier, le poids diminue plus rapidement que la résistance de l'air. C'est la raison connue pour laquelle les corps réduits en

---

[1] Soient t et t' ces deux températures, C la chaleur spécifique de l'air à volume constant, L la chaleur latente d'évaporation de l'eau, M la masse de l'air par unité de volume, et q la masse de vapeur condensée ; on a :

$$L q = C M (t' - t).$$

petits fragments, comme les poussières, poudres inpalpables, et les petites gouttes, tombent très lentement au point de paraître immobiles.

La détermination du diamètre des gouttes d'eau est effectuée au moyen d'une formule [1] où entrent le diamètre, la vitesse de chute des gouttelettes et la viscosité du milieu dans lequel ces dernières se meuvent. Ce diamètre une fois calculé, l'on a immédiatement, d'après le procédé décrit, le nombre des ions, et finalement la charge de chacun.

Le résultat final auquel parvint J.-J. Thomsom après une série d'expériences faites sur l'air ionisé par les rayons X, fut que la charge de chaque ion était (en unités électrostatiques) $6{,}5 \times 10^{-10}$ c'est-à-dire 0,000.000.000.65.

Dans une autre série d'expériences exécutées en recourant à l'action des rayons ultraviolets sur le zinc cette charge fut trouvée égale à $6{,}8 \times 10^{-10}$; assez peu différente, par conséquent, de la précédente valeur.

Plus tard cependant J.-J. Thomson [2] reconnut que ces résultats devaient être corrigés. On a, en effet, constaté que les ions négatifs exigent, pour que la vapeur se condense autour d'eux, une détente plus faible que la détente minima nécessitée pour les ions positifs ; il est donc probable que dans les expériences décrites ci-dessus, peu de ces derniers étaient entrés en action. Et l'on sait maintenant qu'en augmentant brusquement le volume de l'air

---

(1). — Soit v la vitesse de chute d'une gouttelette, r son rayon, μ le coefficient de viscosité de l'air et g l'accélération de la pesanteur, nous avons

$$9\,\mu V = 2\,g\,r^2$$

Pour l'air $\mu = 0{,}000\,18$.

(2) J.-J. Thomson. — *Phil. Mag.* p. 346 (mars 1903).

humide dans le rapport de 1 à 1,25 les ions négatifs fonctionnent seuls comme noyaux de formation de gouttelettes d'eau, et c'est seulement quand la détente est dans le rapport de 1 à 1,31 que les ions positifs commencent à prendre part au phénomène.

De nouvelles expériences, dans lesquelles on a tenu compte de ce fait, ont conduit au résultat plus précis de $3,4 \times 10^{-10}$ unités électrostatiques comme charge d'un ion.

Peu après, de nouvelles recherches sur le même sujet furent instituées par M. H.-A. Wilson [1] en se servant d'une méthode un peu différente, mais qui a l'avantage de ne pas rendre nécessaire l'évaluation du nombre d'ions existant dans l'air traversé par les rayons de Röntgen.

Ici encore, au moyen d'une brusque détente de l'air, l'on fait condenser la vapeur d'eau en gouttelettes dont chaque noyau est constitué par un ion ; mais le brouillard se produit entre deux disques métalliques parallèles. Quand ces disques sont électrisés d'électricités contraires, la vitesse de chute des gouttelettes est diminuée ou augmentée, suivant la direction de la force électrique, par rapport à celle qu'elles possèdent quand il n'existe pas de champ électrique entre les disques métalliques. En mesurant ces vitesses de chute on a tout ce qui est nécessaire pour calculer la charge d'une goutte. [2]

---

(1) H.-A. Wilson. — *Phil. Mag.*, p. 429 (avril 1903).

(2) Soient v_1 et v_2 les vitesses de chute des gouttelettes respectivement quand il n'existe pas de champ électrique et quand ce dernier existe et accélère la chute ; soit X l'intensité du champ électrique, e la charge d'un ion, m la masse d'une gouttelette, g l'accélération due à la pesanteur. L'on a évidemment,

$$m g v_2 = (m g + X e) v_1 ;$$

Sans entrer dans les détails de ces ingénieuses expériences, nous ferons remarquer seulement qu'elles confirment une circonstance déjà notée par J.-J. Thomson, à savoir que si l'intensité des rayons X adoptés pour ioniser l'air est assez forte, plusieurs ions, au lieu d'un seul, peuvent s'associer pour constituer le noyau d'une même goutte. Dans ce cas, la charge de la goutte est double ou triple, etc., de celle appartenant à une goutte dont le noyau n'est constitué que par un seul ion. L'exactitude de cette manière de voir est pleinement confirmée par les expériences de C.-T.-R. Wilson, car, dans ces expériences, le brouillard à peine formé se sépare en plusieurs strates horizontaux descendant avec des vitesses différentes. Ces strates sont évidemment constitués par des gouttelettes ayant pour noyau un simple ion pour le premier strate, deux ions pour le second strate et ainsi de suite.

Il est clair qu'en tenant compte de ce fait, la mesure de la vitesse de chute de l'un quelconque de ces différents strates, nous permettra encore de calculer la charge d'un ion.

Le résultat obtenu par Wilson est exprimé par le nombre $3{,}1 \times 10^{-10}$, assez peu différent de celui de Thomson. Cette valeur coïncide presque avec celle de la charge de l'ion électrolytique d'hydrogène, si

---

Or, $9\,\mu\,v = 2\,g\,r^2$ (voir page 113)

$$m = 3{,}14 \times 10^{-9} \times v\,\frac{3}{2}.$$

En éliminant donc m entre cette relation et la relation précédente, il vient

$$e = 3{,}14 \times 19^{-9} \times \frac{g}{X}\,(v_2 - v_1)\,\sqrt{v_1}$$

relation qui nous permet de calculer e en fontcion de X, v_1 et v_2.

l'on adopte comme masse de ce dernier la valeur que fournit la théorie des gaz.

Les coïncidences numériques que la théorie fait prévoir sont donc vérifiées expérimentalement dans les limites que l'on peut raisonnablement exiger dans ce genre de recherches

CHAPITRE VII

LES ÉLECTRONS ET LA CONSTITUTION DE LA MATIÈRE

La théorie des électrons a, en raison de la facilité avec laquelle elle se prête à fournir un modèle du mécanisme des phénomènes physiques, une incontestable utilité, même aux yeux de ceux qui ne voient en elle qu'un instrument de recherches. En réalité, cette théorie est à peine à son début et il serait prématuré de la considérer dès à présent comme la base certaine d'un nouveau système de philosophie naturelle. Néanmoins, puisque, même sous cet aspect, son importance va toujours en croissant, nous croyons utile de consacrer ce dernier chapitre à une rapide exposition de l'hypothèse suivant laquelle la matière serait constituée par des électrons.

Dans cette nouvelle manière de concevoir la constitution des corps, on assigne donc aux électrons une importance fondamentale ; mais afin qu'il puisse être possible, par leur intermédiaire, de rendre compte des phénomènes connus, il est nécessaire de les supposer doués de certaines propriétés essentielles. C'est ainsi, par exemple, que l'on admet des électrons de deux espèces, jusqu'à un certain point antagonistes entre eux, à savoir, les électrons positifs et les électrons négatifs ; on admet que ces der-

niers seulement peuvent exister libres ; on admet également que la séparation d'un électron négatif a lieu plus facilement, c'est-à-dire avec moins de dépense d'énergie, pour certains atomes, comme, par exemple, les atomes métalliques, que pour d'autres, etc. Toutefois la propriété fondamentale attribuée aux électrons consiste dans leur essence même de charges électriques agissant entre elles de la manière définie par les équations de Hertz ou de Maxwell ; d'où il résulte que la nouvelle théorie n'a pas la prétention de dévoiler complètement la cause première des phénomènes physiques, laquelle reste toujours mystérieuse. Autrefois, on prenait comme point de départ l'existence de l'éther cosmique, et celle de la matière pondérable caractérisée par son attribut principal, l'inertie, et l'on essayait de donner une explication mécanique de tous les phénomènes connus. Aujourd'hui, en partant, au contraire, de l'éther et des électrons, on construit d'abord, pour ainsi dire, avec eux la matière pondérable, et l'on essaie ensuite de rendre compte des phénomènes présentés par cette dernière. On peut donc dire que la théorie des électrons est plus une théorie de la matière qu'une théorie de l'électricité : dans le nouveau système, l'électricité est rangée à la place de la matière dont l'essence, du reste, n'est pas beaucoup mieux connue que ne l'est aujourd'hui l'essence des électrons.

Pour mieux comprendre la portée de l'hypothèse, et les attributs fondamentaux des électrons, il est utile de considérer synthétiquement les phénomènes dus aux corps électrisés fixes ou en mouvement. Nous allons considérer avec O. Lodge le cas de deux corps de nature différente que nous mettrons

en contact et que nous éloignerons ensuite [1]. Ces corps présenteront aussitôt ce complexe de propriétés, qui constitue les deux états électriques opposés, et en particulier, s'attireront et créeront autour d'eux le champ électrique. Si l'un de ces deux corps, celui qui possède l'état électrique positif par exemple, est éloigné indéfiniment, nous n'aurons plus à prendre en considération que le corps négatif. Supposons ce dernier très petit; le champ électrique sera alors représenté par des lignes de force rectilignes arrivant radialement de toutes les directions sur les corps. L'éther environnant sera ainsi déformé, ce dernier mot ayant le sens le plus étendu, c'est-à-dire qu'il se trouvera dans un état contraint qui se manifestera par des tensions le long des lignes de force, cause des forces apparentes à distance, et par des pressions transversales. Quelle est la cause de cet état spécial de l'éther? Comment cet état est-il susceptible d'un double aspect, c'est-à-dire peut-il correspondre à la charge positive et à la charge négative? C'est là précisément où notre ignorance est absolue, de même que l'on ignore à ce moment la structure et la nature même de l'entité qui existe partout et qu'on appelle éther.

Supposons maintenant que le petit corps électrisé négativement se déplace d'un mouvement uniforme, c'est-à-dire supposons qu'il y ait changement de place de l'état spécial de déformation de l'éther défini plus haut. D'après la théorie de Maxwell ainsi que d'après l'expérience, on comprend que cette propagation de place en place de la déformation éthérielle produira le champ magnétique. Celui-ci

---

(1) O. Lodge. — *Journ. of the of Inst. Elect. Engin.*, t. XXXII (1903).

pourra ensuite être considéré à son tour comme dû a une déformation de nature différente, mais analogue à la déformation électrique, en tant que dans le champ magnétique il existe également des tensions le long des lignes de force et des pressions dans le sens transversal. Si le mouvement est rectiligne, les lignes de force magnétique seront des circonférences ayant leurs centres sur la trajectoire suivie par le petit corps électrisé et dont les plans sont perpendiculaires à cette dernière. Une série de corps électrisés, qui se suivent d'un mouvement uniforme, possède la propriété d'un courant électrique. Un courant constant peut donc être considéré comme une suite d'électrons équidistants, se suivant d'un mouvement uniforme ; un courant variable sera une suite d'électrons se suivant d'un mouvement varié, ou ne se suivant pas à des intervalles uniformes.

Lorsque le petit corps électrisé se meut d'un mouvement varié, le champ magnétique créé sera variable, et des phénomènes d'induction prendront naissance ; lorsque le mouvement est périodique, on aura en outre les phénomènes lumineux. Toute variation de la vitesse du corps électrisé engendrera une variation dans le champ magnétique ; celle-ci produira à son tour une variation du champ électrique, et ces variations se propageront de place en place avec la vitesse de la lumière.

Imaginons maintenant que le corps électrisé étant animé d'un mouvement uniforme, l'on veuille, à un moment donné, augmenter sa vitesse. Que va-t-il, se passer ? En vertu des relations existant dans un champ électro magnétique entre la force électrique et la force magnétique, il ne sera pas possible d'ac-

célérer le mouvement du corps électrisé sans mettre en jeu de l'énergie; à une augmentation de vitesse succèdera, en effet, une variation du champ magnétique qui, à son tour, fera naître une force électrique tendant à s'opposer à l'accélération du mouvement. De même, uue diminution de vitesse sera suivie de l'apparition d'une force électrique qui tendra à faire conserver au corps électrisé sa vitesse. Dans les deux cas, le phénomène électromagnétique a donc pour effet de *simuler* l'inertie, et le corps en mouvement par le fait d'être électrisé se comporter comme si sa masse était plus grande que celle qu'il possède réellement.

Tout ce que l'on dit du petit corps électrisé subsiste également pour un électron et la masse de celui-ci, que nous avons déja dit être plus de mille fois inférieure à celle d'un atome d'hydrogène est, au moins en partie, apparente et non pas réelle.

Ce genre d'inertie apparente que présente un corps électrisé, ou un électron, représente le phénomène qui, dans le cas du courant électrique, porte le nom de self-induction.

Si, en effet, au lieu d'un seul électron en mouvement il en existe un grand nombre, et s'ils se suivent à de petits intervalles égaux le long d'une même trajectoire, nous avons l'équivalent d'un courant électrique. L'augmentation ou la diminution de la vitesse d'un électron donnera lieu à une augmentation ou à une diminution du nombre des électrons qui, pendant l'unité de temps, passent par un point donné de la trajectoire ; cela correspond à une augmention ou diminution de courant. De plus, ce que l'on a dit de l'effet d'une variation de vitesse pour un corps unique en mouvement, ou pour un seul électron,

est encore substantiellement vrai pour des électrons en nombre quelconque, et toute variation de vitesse des électrons fera naître une force qui s'opposera à cette variation. Donc, toute variation d'intensité du courant fera naître une force électromotrice, qui tendra à s'opposer à cette variation ; ou encore elle produira un nouveau courant de direction telle qu'il atténuera cette variation. Ce courant sera donc ce que l'on appelle l'extra-courant, et cette force électromotrice sera la force électromotrice de self-induction.

L'on peut donc dire, en résumé, que les électrons déterminent la production des phénomènes électrostatiques, quand ils sont immobiles, des phénomènes magnétostatiques ou des courants constants quand ils constituent un flux uniforme, et des phénomènes électromagnétiques ou optiques lorsqu'ils se meuvent d'un mouvement non uniforme ou lorsqu'ils possèdent un mouvement périodique.

Une brusque variation de vitesse d'un électron, qui peut, par exemple, être due à un choc, fera naître dans l'éther une onde électromagnétique analogue aux ondes aériennes d'explosion. Les rayons X, dont la vitesse de propagation semble être égale à celle de la lumière [1] sont la manifestation de ces ondes.

Cela posé, nous sommes maintenant en mesure de comprendre en quoi consiste l'hypothèse moderne suivant laquelle la matière est constituée d'électrons. Et d'abord l'on peut admettre que les électrons ne sont pas de la matière dans le véritable sens du mot, c'est-à-dire qu'ils ne possèdent d'autre masse que celle qu'ils semblent posséder par suite de leur

---

[1] R. Blondlot. — *Comptes rendus*, t. CXXXV, p. 666 et 724 (1903).

mouvement et de leur charge. Les expériences de M. Kaufmann, citées dans le précédent chapitre, rendent assez probable cette hypothèse. Il trouva, en effet, que le rapport de la charge des électrons en mouvement à leur masse croît rapidement lorsque leur vitesse s'approche suffisamment de la vitesse de la lumière. Et comme l'hypothèse qui supposerait la charge variable serait trop invraisemblable, on est forcément amené à penser à une augmentation de la masse. Or un tel résultat est d'accord avec l'hypothèse, suivant laquelle la masse des électrons est entièrement électromagnétique.

Par conséquent, les électrons considérés comme de simples charges électriques privées de matière, ou encore considérés comme constitués par une modification de l'éther symétriquement distribué autour d'un point, simulent parfaitement, en vertu des lois du champ électromagnétique, l'inertie, présentant ainsi la propriété fondamentale de la matière ; rien n'empêche donc de supposer cette dernière, et par suite tous les corps connus, comme des agrégations ou des systèmes d'électrons.

On peut, par suite, admettre qu'un atome matériel n'est autre chose qu'un système constitué par un certain nombre d'électrons positifs et par un nombre égal d'électrons négatifs, ces derniers, ou au moins une partie de ces derniers, se mouvant autour de la partie restante à la manière des satellites autour des planètes. Les forces moléculaires et atomiques ne seraient ainsi que des manifestations des forces électromagnétiques des électrons, et la gravitation même trouverait son explication en partant de cette hypothèse ; ce qui a, du reste, déjà été tenté.

Un atome privé d'un ou plusieurs électrons néga-

tifs deviendra un ion positif, pendant que l'union d'un ou plusieurs électrons négatifs à un atome neutre donnera naissance à un ion négatif.

La manière dont les différents corps se comportent vis à vis des rayons cathodiques, c'est-à-dire vis à vis des électrons libres en mouvement, témoigne, d'ailleurs, en faveur de l'hypothèse exposée. On a, en effet, reconnu qu'un corps arrête en partie les électrons, c'est-à-dire qu'il absorbe les rayons cathodiques, en raison de sa densité, en d'autres termes, en raison du nombre d'électrons qui le constituent, et cela indépendamment du mode d'après lequel ils sont groupés pour former des atomes chimiques de diverses espèces.

Les électrons seraient donc les éléments constitutifs dans l'architecture des atomes. En adoptant une pareille hypothèse, le dogme de l'invariabilité de l'atome chimique et de la non-transmutation des substances chimiques l'une dans l'autre est définitivement banni de la science; toutes les substances sont, en effet, constituées d'électrons. Les phénomènes de la radioactivité nous semblent d'ailleurs donner un exemple de transformation de ce genre (voir page 89).

Si l'on retient ensuite que tous les corps sont radioactifs, du moins à un faible degré, et émettent, par suite, des ions et des électrons, ces nouvelles hypothèses sur la structure de la matière ressemblent singulièrement à celles, que fit connaître, il y a plus d'un demi siècle, un physicien italien d'un génie fin et original, Ambrogio Fusinieri [1], et qu'il posa comme base d'une explication générale des phénomènes physiques.

---

[1] A. Fusinieri. — Memorie, Padova ; 1844, 1846, 1847.

Les conceptions de ce physicien, quoiqu'ayant aujourd'hui perdu une partie de leur valeur à la lumière des faits ultérieurement connus, nous font néanmoins spontanément penser à ce qu'il appelait « *la materia attenuata* » émise par tous les corps; et il est intéressant de rapprocher de la « *materia attenuata* » les électrons et l'émanation émise par les corps radioactifs. Ce serait comme une espèce d'évaporation lente et invisible par laquelle toute matière se répand continuellement dans l'espace environnant.

TABLE DES MATIÈRES

SENS. — Société Nouvelle de l'Imprimerie Miriam

1879