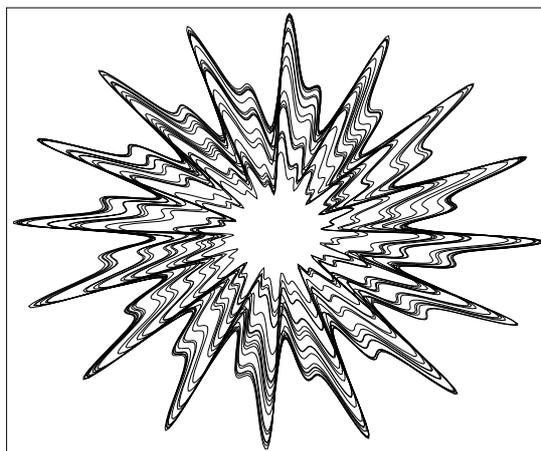


# Une histoire de l'atomisme : 1750-1920

Christophe Letellier  
Université de Rouen  
Christophe.Letellier@coria.fr



Notes de cours : version contenant encore des fautes de traduction et d'orthographe (19 mai 2007)



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>De la chimie à la physique</b>	<b>7</b>
2.1	Les premières lois empiriques de la chimie . . . . .	7
2.2	Aimants et magnétisme . . . . .	15
2.3	L'électrochimie . . . . .	20
2.4	Naissance de l'électromagnétisme . . . . .	22
2.5	La synthèse de Maxwell . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Les décharges dans les gaz basse pression</b>	<b>26</b>
3.1	Les premiers tubes à décharges . . . . .	26
3.2	Des Rayons X à l'électron . . . . .	31
3.3	Les premiers modèles atomiques . . . . .	39
3.4	Modèle saturnien de Nagaoka . . . . .	45
3.5	Nombre de corpuscule dans un atome . . . . .	48
3.6	Retour sur la charge des particules $\alpha$ . . . . .	49
3.7	Diffusion et réflexion de particules $\alpha$ . . . . .	50
3.8	Le noyau ponctuel de Rutherford . . . . .	55
3.9	La quantification du moment cinétique de Nicholson . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Le modèle de Bohr</b>	<b>60</b>

# 1 Introduction

- Qu'y a-t-il de semblable entre du bois et de la craie ?
- Qu'est-ce que pour vous, un atome ?
- Est-ce différent d'une particule ou d'un élément ?
- Dans quel domaine trouve-t-on une particule ?
- Pouvez-vous imaginer ce que serait la matière sans avoir recours au concept d'atome ?

Poème de Lucrèce (99-55) <sup>1</sup> :

Les corps, ce sont d'une part les principes simples des choses, les atomes, et d'autre part les composés, formés par ces éléments premiers. Pour ceux-ci, il n'est aucune force qui puisse les détruire; à toute atteinte leur solidité résiste... Au reste, si l'on **n'admet pas dans la nature un dernier terme de petitesse**, les corps les plus petits seront composés d'une infinité de parties, puisque chaque moitié aura toujours une moitié et cela à l'infini. Quelle différence y aurait-il alors entre l'univers même et le plus petit corps ? On n'en pourrait point établir; car si infiniment étendu qu'on suppose l'univers, les corps les plus petits seraient eux aussi composés d'une infinité de parties. La droite raison se révolte contre cette conséquence et n'admet pas que l'esprit y adhère; aussi faut-il t'avouer vaincu et reconnaître qu'il **existe des particules irréductibles à toute division** et qui vont jusqu'au dernier degré de la petitesse; et, puisqu'elles existent, tu dois reconnaître aussi qu'elles sont **solides et éternelles**.

**Les atomes doivent donc se précipiter avec la même vitesse**, quoique leur poids diffère, **dans le vide qui ne leur résiste pas**; et il est impossible que les plus pesants tombent sur les plus légers, amènent des chocs, et varient le mouvement pour aider aux créations de la nature.

Encyclopédie de Diderot et d'Alembert, publiée dans les années 1750 :

ATOME, (Hist. nat.) animal microscopique, le plus petit, à ce qu'on prétend, de tous ceux qu'on a découverts avec les meilleurs microscopes. On dit qu'il paroît au microscope, tel qu'un grain de sable fort fin paroît à la vûe, & qu'on lui remarque plusieurs piés, le dos blanc, & des écailles.

ATOMES, s. m. petits corpuscules indivisibles; qui, selon quelques anciens philosophes, étoient des élémens ou parties primitives des corps naturels. Ce mot vient d' $\alpha$  privatif, & de  $\tau\omicron\mu\omicron\sigma$ , je coupe. Atomes se dit aussi de ces petits grains de poussiere qu'on voit voltiger dans une chambre fermée, dans laquelle entre un rayon de soleil.

Les encyclopédistes poursuivent avec une description de la matière :

Il y a toujours eu une quantité immense & réellement infinie d'atomes ou corpuscules durs, crochus, quarrés, oblongs, & de toutes figures; tous indivisibles, tous en mouvement & faisant effort pour avancer; tous descendant & traversant le vuide : s'ils avoient toujours continué leur route de la sorte, il n'y auroit jamais eu d'assemblages, & le monde ne seroit pas; mais quelques-uns allant un peu de côté, cette **légère déclinaison** en serra & accrocha plusieurs ensemble : de-là se sont formées diverses masses; un ciel, un soleil, une terre, un homme, une intelligence, & une sorte de liberté. **Rien n'a été fait avec dessein : il faut bien se garder de croire que les jambes de l'homme aient été faites dans l'intention de porter le corps d'une place à une autre**; que les doigts aient été pourvus d'articulations pour mieux saisir ce qui nous seroit nécessaire; que la bouche ait été garnie de dents pour broyer les alimens; ni que les yeux aient été adroitement suspendus sur des muscles souples & mobiles, pour pouvoir se tourner avec agilité, & pour voir de toutes parts en un instant. Non, **ce n'est point une intelligence** qui a disposé ces parties afin qu'elles pussent nous servir; mais nous faisons usage de ce que nous trouvons capable de nous rendre service.

Le tout s'est fait **par hasard**, le tout se continue, & **les especes se perpétuent les mêmes par hasard** : le tout se dissoudra un jour par hasard : tout le système se réduit là.<sup>2</sup>

- négation du créationisme
- absence de toute prédétermination
- règne du hasard
- opposé à toute évolution

On peut également consulter l'article :

PARTICULE, s. f. (Physique) Les particules sont donc comme les élémens des corps; c'est leur arrangement différent & leur contexture, avec la différence de cohésion, qui constitue les différentes sortes de corps, durs, mous, secs, liquides, pesans, légers, &c. Les particules **les plus petites** ou les corpuscules s'unissent, suivant les Newtoniens, par **l'attraction la plus forte**, & composent des particules plus grosses dont l'union est plus foible, & plusieurs

<sup>1</sup>Lucrèce, *De natura rerum*.

<sup>2</sup>Hist. du ciel, tom. II. pag. 211. 212.

de ces parties réunies ensemble forment des particules **encore plus grosses dont l'union est toujours plus faible**; & ainsi par différents degrés jusqu'à ce que la progression finisse par les particules les plus grosses, desquelles dépendent les opérations chimiques & les couleurs des corps naturels, & qui, en s'unissant, composent les corps des masses sensibles.

- ⇒ stabilité liée à la taille
- ⇒ nécessité d'une faible stabilité pour obtenir une réaction
- **Qu'est-ce qu'un élément ?**
- **Dans quel domaine a-t-on besoin de la notion d'élément ?**
- théorie des quatre éléments

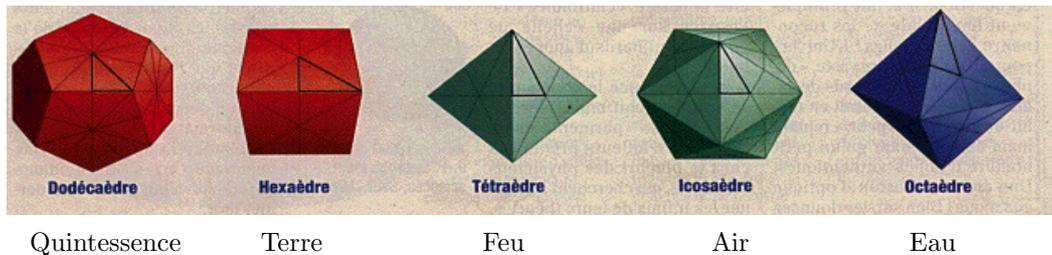


FIG. 1 – Association des cinq polyèdres réguliers aux cinq éléments selon la cosmogonie de Platon.

Les cosmogonies, du Yi-king chinois à la Grèce, s'appuient sur les quatre éléments parce qu'ils sont à la source de tout ce qui vit, évolue, meurt et se recrée.

1. Le froid et l'humidité produisent l'Eau ;
2. la chaleur et l'humidité l'Air ;
3. la chaleur et le sec, le Feu ;
4. le sec et le froid, la Terre.

La nature repose apparemment sur ce quadruple principe, illustré symboliquement par le carré.  
 ⇒ Printemps, été, automne, hiver ou matin, midi, soir et nuit <sup>3</sup>.

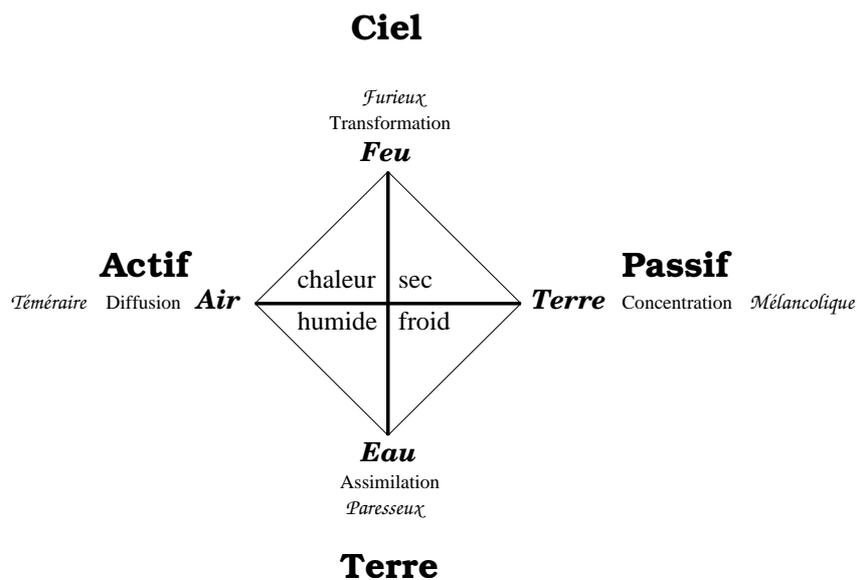


FIG. 2 – Représentation symbolique du principe de la constitution de la Matière reposant sur le carré et la croix.

<sup>3</sup>M. Delmar, *Symboles de l'astrologie*, Editions Assouline, 1999.

Descartes (1596-1650) s'oppose clairement au raisonnement de Lucrece <sup>4</sup> :

Qu'il ne peut y avoir aucun atome ou petit corps indivisible.

Il est aussi très-aisé de connaître qu'il ne peut y avoir des atomes, ou des parties de corps qui [...] soient indivisibles, *ainsi que quelques Philosophes l'ont imaginé*. D'autant que, si petites qu'on suppose ces parties, parce qu'il faut qu'elles soient étendues, nous concevons néanmoins qu'il n'y en a pas entre elles qui ne puisse être encore divisée en deux ou plus grand nombre d'autres plus petites, d'où il suit qu'elle est divisible. Car, de ce que nous *connaissions clairement et distinctement* qu'une chose peut être divisée, nous devons *juger* qu'elle est divisible, parce que, si nous en jugions autrement, le jugement que nous ferions de cette chose serait contraire à la connaissance que nous en avons. Et quand même nous supposerions que Dieu eût réduit quelque partie de la matière à une petitesse si extrême, qu'elle ne pût être divisée en d'autres plus petites, nous ne pourrions conclure pour cela qu'elle serait indivisible, parce que, quand Dieu aurait rendu cette partie si petite qu'il ne serait pas au pouvoir d'aucune créature de la diviser, il n'a pu se priver lui-même du pouvoir qu'il avait de la diviser, à cause qu'il n'est pas possible qu'il diminue sa toute-puissance, comme il a été déjà remarqué. C'est pourquoi [...] nous dirons que *la plus petite partie étendue qui puisse être au monde*, peut toujours être divisée, parce que telle est sa nature.

⇒ véritable négation d'une matière discontinue



RENÉ DESCARTES  
(1596-1650)



ROBERT BOYLE  
(1627-1691)



ISAAC NEWTON  
(1642-1727)

Robert Boyle (1627-1691), *The Sceptical Chymist* (1661) :

je ne rougis pas que j'ai moins de scrupules à confesser que je doute quand je le fais, que de professer que je sais ce quand ce n'est pas le cas

PROPOSITION I. — Il ne semble pas absurde de concevoir qu'à la production première des corps composés, la matière universelle, dont consistent les autres parties de l'univers, était en fait divisée en petites particules de différentes tailles et formes se mouvant de manières variées.

PROPOSITION II. — Il n'est pas non plus impossible que, de ces minuscules particules diverses parmi les plus petites et voisines les unes des autres, certaines se soient associées de ci et de là en masses minuscules ou agglomérats, et constituèrent par leurs coalitions une grande réserve de ces petites concrétions primaires, ou que les masses qu'il y avait n'étaient facilement dissipées en ces particules dont elles étaient composées.

PROPOSITION III. — Je ne dénierai pas péremptoirement que, de la plupart de ces corps composés prenant part à la nature animale ou végétale, peuvent à l'aide du feu être effectivement obtenues d'un nombre déterminé (soit trois, quatre, ou cinq, ou quelques uns ou plus) de substances, méritant des dénominations différentes.

PROPOSITION IV. — Il pourrait être remercié, que ces substances, dont le concret généralement soit se procure, soit en est fait, pourraient sans beaucoup d'inconvénients être appelés leurs éléments ou leurs principes.

⇒ aboutit à une classification rudimentaire

– presque tous les corps minéraux qui peuvent être réduits en une partie saline, une sulfureuse et une de mercure ;

---

<sup>4</sup>R. Descartes, *Des principes des choses matérielles* (1644).

- presque tous les végétaux et animaux qui peuvent être divisés en cinq substances que sont le sel, l'alcool, l'huile, le mucus et la terre.

Isaac Newton, *Optiks*, 1704 :

Tenant compte de toutes ces choses, il me parut que Dieu, au commencement, forma la Matière de Particules solides, massives, dures, impénétrables, mobiles, d'une taille telle, de figures telles, de Propriétés telles, de Proportion à l'Espace telle qu'elles conviennent le mieux à la Fin pour laquelle Il les a formées; il me paraît aussi que ces Particules primitives étant Solides, elles sont incomparablement plus dures que n'importe quel corps poreux composé d'elles, si dures qu'elles ne peuvent jamais être détériorées ou brisées en morceaux, aucun Pouvoir ordinaire n'étant capable de diviser ce que Dieu, lui-même, fit dans la Création première.

- Encyclopédie Diderot & d'Alembert :

ELEMENS, s. pl. m. On appelle ainsi en Physique les parties primitives des corps. Les anciens, comme tout le monde sait, admettoient quatre élémens ou corps primitifs dont ils supposoient les autres formés, l'air, le feu, l'eau, la terre; & cette opinion, quoiqu'abandonnée depuis, n'étoit pas si déraisonnable, car il n'y a guere de mixte dans lequel la Chimie ne trouve ces quatre corps, ou du moins quelques-uns d'eux. Descartes est venu, qui à ces quatre élémens en a substitué trois autres, uniquement tirés de son imagination, la matiere subtile ou du premier élément, la matiere globuleuse ou du second, & la matiere rameuse ou du troisieme. Aujourd'hui les Philosophes sages reconnoissent,

- 1°. qu'on ignore absolument en quoi consistent les élémens des corps.
- 2°. Qu'on ignore encore, à plus forte raison, si les élémens des corps sont tous semblables, & si les corps different entr'eux par la différente nature de leurs élémens, ou seulement par leur différente disposition.
- 3°. Qu'il y a apparence que les élémens ou particules primitives des corps sont durs par eux-mêmes.

On sera peut-être étonné de la briéveté de cet article : mais nos connoissances sur ce qui en fait l'objet sont encore plus courtes. (O)

- Encyclopédie *Universalis* :

L'atome est le terme ultime de la division de la matière dans lequel les éléments chimiques conservent leur individualité. C'est la plus petite particule d'un élément qui existe à l'état libre ou combiné. On connaît 90 éléments naturels auxquels s'ajoutent le technétium (Tc,  $Z = 43$ ), le prométhéum (Pm,  $Z = 61$ ) ainsi que les transuraniens obtenus artificiellement depuis 1940. Les corps simples sont exclusivement constitués d'atomes identiques; les corps composés sont formés de la réunion d'atomes différents. On appelle molécules des groupements d'atomes caractéristiques de chaque espèce chimique. L'étymologie renvoie à l'idée assurée jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle que les atomes sont indivisibles. Mais la physique moderne a révélé leur structure complexe à laquelle participent des particules infimes, protons et neutrons groupés dans un noyau, autour duquel se meuvent des électrons. Les dimensions du noyau sont de l'ordre de  $10^{-12}$  cm, celles des atomes, avec leur cortège électronique, de l'ordre de  $10^{-8}$  cm. Deux atomes qui ont le même nombre de protons et d'électrons, mais qui diffèrent par leur nombre de neutrons, ont les mêmes propriétés chimiques, mais leurs propriétés nucléaires sont différentes. Ce sont des isotopes. Un élément préparé par voie chimique est, en général, un mélange d'isotopes qui ne peuvent pas être séparés par des réactions chimiques.

La stabilité d'un système atomique — molécule, atome, noyau — dépend du rapport entre son énergie de liaison et les énergies des processus auxquels il est soumis. Si ces énergies sont beaucoup plus petites que l'énergie de liaison, le système atomique se comporte comme une particule indivisible.

- **Quelle notions sont apparues — explicitement ou implicitement — depuis 1750 ?**
- **Pouvez-vous citer les noms de scientifiques qui ont contribué à faire évoluer le concept de l'atome entre 1750 et 1920 ?**
- **Quelles sont les évidences expérimentales qui ont conduit à la notion d'électron ? de proton ? de neutron ?**

Au tournant du XX<sup>e</sup> siècle, les réticences vis-à-vis de l'existence de l'atome sont encore nombreuses : Par exemple, Marcelin Berthelot, chimiste et politicien puissant, est un farouche anti-atomiste <sup>5</sup> :

Je ne veux pas voir la chimie dégénérer en religion. Je ne veux pas que l'on croie à l'existence réelle des atomes comme les chrétiens croient à la présence réelle de Jésus-Christ dans l'hostie consacrée.

<sup>5</sup>Cité par J. Jacques, *Berthelot, autopsie d'un mythe*, Belin, p. 205, 1987.

Citons encore, Henri Sainte-Claire Deville (1818-1881) — directeur du laboratoire de chimie de l'École Normale Supérieure de 1851 à 1881 — lors de sa leçon inaugurale à la Sorbonne <sup>6</sup> :

L'hypothèse des atomes, l'abstraction de l'affinité, des forces de toute sorte que nous faisons présider à toutes les réactions des corps que nous étudions, sont de pures inventions de notre esprit, des noms que nous faisons substance, des mots auxquels nous prêtons une réalité [...]. Je ne sais pas la définition qu'on peut donner du matérialisme dans la science : mais ce qu'il y a de plus dangereux, c'est de mettre de l'esprit dans la matière : car alors on apporte le mysticisme et la superstition et alors on tombe dans ces étranges théories modernes dont on trouve des expressions dans les caricatures allemandes.

Les successeurs de Sainte-Claire Deville sont également de farouches anti-atomistes : Henri Debray, André Joly et Désiré Gernez.

Cette résistance perdurera. Par exemple, Pierre Duhem (1861-1916) qui, entre autres, contribua au développement de la thermodynamique, écrit encore en 1913 <sup>7</sup> :

L'école néo-atomiste, dont les doctrines ont pour centre la notion d'électrons, a repris avec une superbe confiance la méthode que nous nous refusons à suivre. Elle pense que ses hypothèses atteignent enfin la structure intime de la matière, qu'elles nous en font voir les éléments, comme si quelque extraordinaire ultra-microscope les grossissait jusqu'à nous les rendre perceptibles [...]. Le temps viendra sans doute où, par leur complication croissante, ces modèles cesseront d'être des auxiliaires pour le physicien, où il les regardera plutôt comme des embarras et des entraves.

- **Quel est l'argument important des anti-atomistes ?**
- **Quelles sont les bases de votre conviction, aujourd'hui ?**

## 2 De la chimie à la physique

### 2.1 Les premières lois empiriques de la chimie



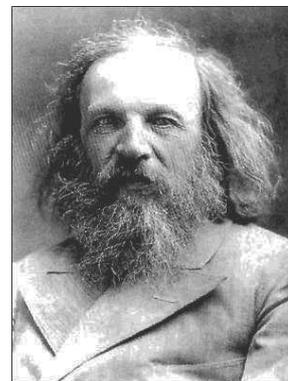
ANTOINE LAVOISIER  
(1743-1794)



JOSEPH-LOUIS PROUST  
(1754-1826)



JOHN DALTON  
(1766-1844)



DMITRI MENDÉLÉÏEV  
(1834-1907)

Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) renouvelle la chimie en se reposant sur le principe d'économie cher à Newton et hérité de Guillaume d'Occam <sup>8</sup> :

Rien ne se crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, et l'on peut poser en principe que, dans toute opération, il y a une égale quantité de matière avant et après l'opération ; que la qualité et la quantité des principes sont les mêmes et qu'il n'y a que des changements, des modifications.

<sup>6</sup>Cité par M. Goupil, *Actualité \*chimique*, p. 39, 1981.

<sup>7</sup>P. Brouzeng, *Duhem : Science et Providence*, Belin, 1987.

<sup>8</sup>G. d'Occam, philosophe anglais de la première moitié du xiv<sup>e</sup> siècle. Il développa une théorie de la connaissance, appelée *nominalisme*. Son rasoir est une lame qui tranche au plus juste et supprime tout ce qui est inutile : *il ne faut pas multiplier les êtres sans nécessité*. Ainsi, pour expliquer un phénomène qui se manifeste à notre expérience, on doit s'efforcer d'en trouver la ou les causes dans d'autres phénomènes que nous connaissons déjà ; on aura recours à des principes échappant à notre expérience que si toute autre explication fait défaut.

- L'apport principal de Lavoisier réside dans un effort d'une méthode de nomenclature rationnelle, une classification méthodique et une théorie de la matière où tout est résoluble en réarrangements de combinaisons.
- En 1768, il entreprit d'approfondir la nature des quatre éléments d'Aristote.
- limiter l'étendue du désordre qui régnait parmi les différentes matières des chimistes

En 1782, Louis Guyton de Morveau posa cinq règles fondamentales du langage chimique rationnel<sup>9</sup> :

1. Chaque substance doit avoir un nom et ne pas être désignée par une circonlocution.
2. Le nom d'un composé chimique doit en évoquer les constituants et le caractériser sans rappeler le nom de l'inventeur.
3. Toute substance de composition incertaine doit recevoir une dénomination ne signifiant rien, plutôt qu'une autre pouvant exprimer une idée fausse.
4. Les termes nouveaux sont à former d'après des racines prises dans les langues mortes les plus généralement répandues, c'est-à-dire le grec ou le latin.
5. Enfin les noms doivent être assortis au génie de chaque langue.

Lavoisier<sup>10</sup> :

- Il est temps de débarrasser la chimie des obstacles de toute espèce qui retardent ses progrès, d'y introduire un véritable esprit d'analyse,
- ⇒ c'est par le perfectionnement du langage que cette réforme doit être opérée ;
- ⇒ mais toute nomenclature nouvelle sera loin de son état de perfection ;

Joseph-Louis Proust (1754-1826) : *Recherches sur le cuivre* (1799)

- Nous devons reconnaître qu'une main invisible tient la balance pour nous durant la formation des composés et façonne leurs propriétés selon sa volonté.
- Nous devons conclure que la nature n'opère autrement dans la profondeur du monde qu'à sa surface ou dans les mains de l'homme.
- Ces proportions immuables, ses attributs constants, caractérisent les vrais composés de l'art (du chimiste) ou de la nature  
⇒ mêmes règles pour la chimie et pour la nature
- *loi des proportions pondérales*

*La proportion suivant laquelle deux éléments se combinent ne peut pas varier de façon continue.*

⇒ *quantification* de la chimie...

- le carbone et l'oxygène ne peuvent s'unir que dans une seule proportion.
- En France, opposition marquée de Claude-Louis Berthollet (1748-1822) qui doutait de l'existence d'une règle permettant de distinguer une combinaison chimique d'une simple solution.
- Ceci cessera d'être discuté avec les travaux de John Dalton (1766-1844) de 1801 et que la systématisation des mesures de poids atomiques par Jöns Berzelius (1779-1848) à partir de 1811.

En 1803, Dalton *Un nouveau système de philosophie chimique* (1808)

- dégage certaines des propriétés que doit posséder un atome.
- les éléments sont composés d'atomes minuscules sous forme de sphères dures et incassables
- Elles sont tenues entre elles par des forces d'attraction, plus ou moins puissantes selon les circonstances ⇒ *attraction de cohésion*

<sup>9</sup>L. Guyton de Morveau, Mémoire sur les dénominations chimiques, la nécessité d'en perfectionner le système, et les règles pour y parvenir, *Journal de physique*, Mai 1782.

<sup>10</sup>A. L. Lavoisier, Mémoire sur la nécessité de réformer et de perfectionner la nomenclature chimique, *Compte-Rendu de l'Académie Royale des Sciences*, 18 Avril 1787.

- Elles se rassemblent d'un état dispersé selon une force d'*attraction d'aggrégation*, ou plus simplement force d'*affinité*.
  - $\Rightarrow$  introduction de mots nouveaux pour désigner des phénomènes mal compris...
- Dalton pensait les atomes comme des particules identiques :
- Nous n'avons aucune raison d'appréhender une diversité d'entités
  - S'il en est ainsi pour l'eau, il doit en être de même pour ces constituants, l'hydrogène et l'oxygène
  - Si des particules d'eau étaient plus lourdes que les autres et si une portion de liquide était constituée principalement de ces particules plus lourdes, elle devrait affecter la gravité spécifique de la masse, un fait qui n'est pas connu. Et de même pour toute autre substance.
  - Les particules ultimes de tout corps homogène sont parfaitement identiques, en poids, formes, etc.
  - « chaque particule d'eau est identique à toute autre particule d'eau »

Au chapitre III, sur les synthèses chimiques :

- Lorsque nous pensons au nombre de particules dans l'atmosphère, c'est comme d'essayer de penser au nombre d'étoiles dans l'univers...
- mais si nous limitons le sujet en prenant un volume donné de gaz, nous sommes persuadés que le nombre de particules doit être fini, juste comme dans un espace donné de l'univers, le nombre d'étoiles et de planètes ne peut pas être infini...
- $\Rightarrow$  raisonnement par analogie, extrapolation, en raison de l'absence d'expériences appropriées
- L'analyse chimique et la synthèse ne sont rien d'autre que la séparation des particules les unes des autres, et leur réunion.
- Il n'y a ni création, ni destruction de matière
- Important : détermination des poids relatifs des simples constituant un composé
- $\Rightarrow$  déterminer les poids relatifs des particules ultimes, le nombre de simple particules élémentaires constituant une particule composées, et le nombre de particules composées entrant dans la formation d'une particule plus composée, etc.
- Soit deux corps, A et B, disposés à se combiner, les combinaisons possibles peuvent être (en partant de la plus simple) :
  - 1 atome de A + 1 atome de B = 1 atome de C, binaire.
  - 1 atome de A + 2 atomes de B = 1 atome de D, ternaire.
  - 2 atomes de A + 1 atome de B = 1 atome de E, ternaire.
  - 1 atome de A + 3 atomes de B = 1 atome de F, quaternaire.
  - 3 atomes de A + 1 atome de B = 1 atome de G, quaternaire.
  - &c.

De l'application des ces lois, nous obtenons

1° l'eau est un composé binaire d'hydrogène et d'oxygène, et les poids relatifs de deux atomes élémentaires sont 1 :7, à peu près ;



mais O=7 au lieu de O=16 (les poids relatifs sont donc préservés !)

2° l'ammoniac est un composé binaire d'hydrogène et d'azote, et leurs poids relatives sont 1 :5, à peu près ;



mais N=5 au lieu de N=14

où les poids sont exprimés en atomes d'hydrogène, chacun représentant l'unité.

- *loi des proportions multiples*

Si l'on prend au hasard deux composés définis dans la multitude de ceux qui contiennent les corps simples A et B, et si l'on compare les masses de l'élément B qui s'y trouvent unies à une même masse de l'élément A, on trouve que ces masses sont généralement dans un rapport très simple. En particulier, elles peuvent être, et elles sont fréquemment, exactement égales.

Dalton proposa alors une première liste des atomes avec leur poids respectifs dont nous reportons ici les vingt premiers :

Hydrogène, en poids relatif	1	Chaux	23	Cuivre	56
Azote	5	Soude	28	Plomb	95
Carbone	5	Potasse	42	Argent	100
Oxygène	7	Strontites	46	Platine	100
Phosphore	9	Barytes	68	Or	140
Soufre	13	Fer	38	Mercure	167
Magnésium	20	Zinc	56		

A partir de l'étude des réactions chimiques, il énonce alors des lois empiriques :

1. Les atomes d'un élément donné sont identiques. En effet, tous les carbones ont les mêmes propriétés physiques et chimiques.
2. Les atomes d'un élément donné sont différents de ceux de n'importe quel autre élément puisque les atomes carbonés ont des propriétés physiques et chimiques différentes des atomes sulfurés.
3. Les atomes d'un élément se combinent avec des atomes d'autres éléments pour former des composés, ce qui est confirmé par la loi d'action des masses et des formules chimiques.
4. Les atomes sont indivisibles dans les processus chimiques car tous les atomes présents au début de la réaction le sont aussi à la fin ; les atomes ne sont pas créés ou détruits, ils sont juste réarrangés ; enfin les atomes d'un élément ne peuvent se transformer en atomes d'un autre élément.

Il résume sa théorie dans l'expression <sup>11</sup> :

Les éléments ou atomes de tels corps sont pensés comme étant simple, et sont représentés par des petits cercles, avec des marques distinctives ; et leur combinaison consiste en la juxtaposition de plusieurs d'entre eux.



FIG. 3 – Représentation schématique des éléments chimiques par Dalton.

<sup>11</sup>Ibid., chap III.

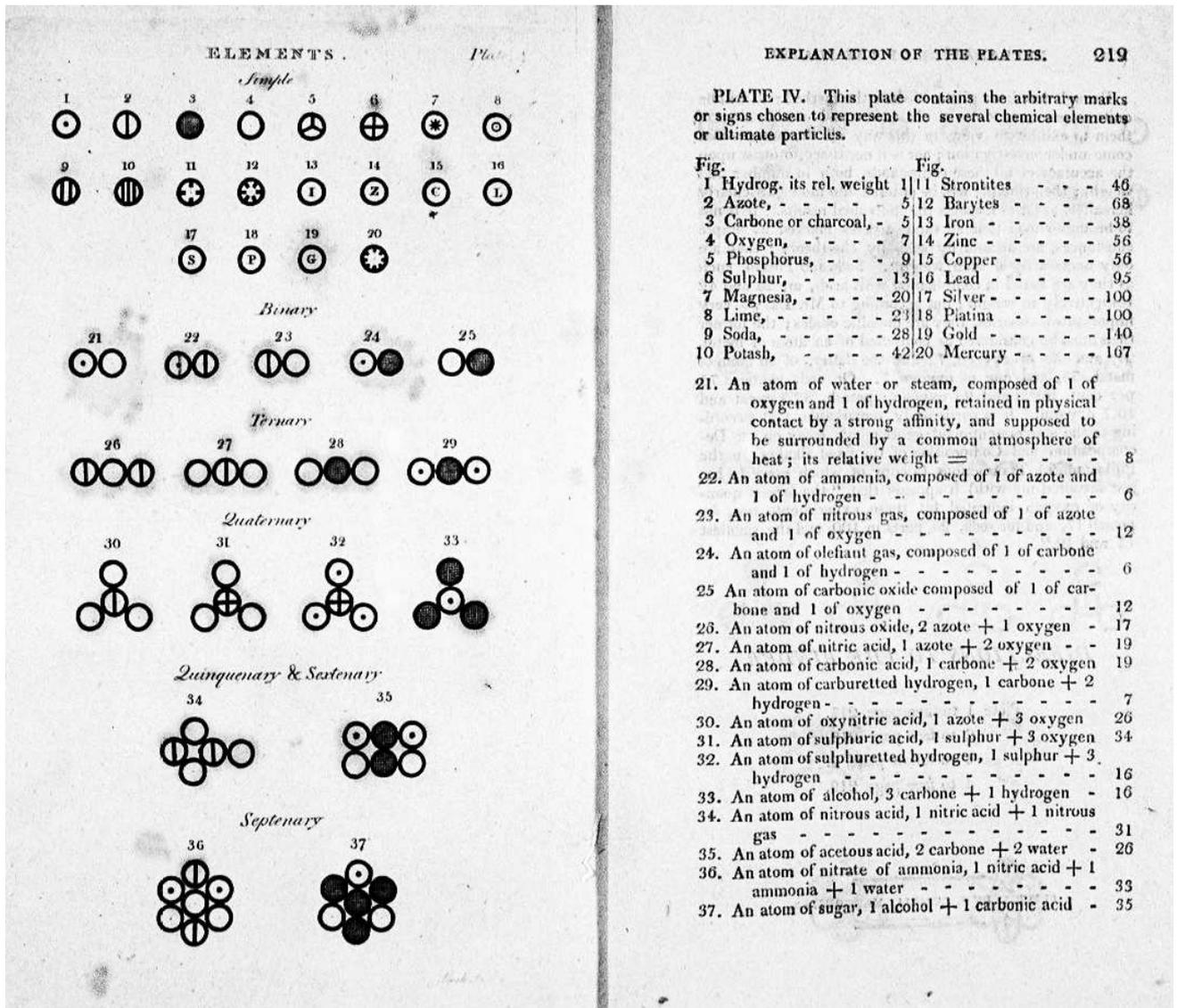


FIG. 4 – Représentation schématique des molécules par Dalton.

- Dmitri Mendéléïev (1834-1907) commença par une étude des groupes naturels
- le groupe des métaux dits alcalins : le potassium (K), le lithium (Li), le sodium (Na), le rubidium (Rb) et le césium (Cs);
- le groupe des métalloïdes dits halogènes : le brome (Br), l'iode (I), le fluor (F) et le chlore (Cl).
- Classe les métaux alcalins dans l'ordre de leur poids atomiques

Li	Na	K	Rb	Cs
7	23	39	85,4	133

- ⇒ l'activité chimique va croissant de l'élément le plus léger à l'élément le plus lourd
- Classe les halogènes

F	Cl	Br	I
19	35,5	80	127

- ⇒ l'activité chimique décroît avec le poids
- relation entre les propriétés chimiques et les poids atomiques des éléments
- étape décisive

C'est dans la comparaison d'éléments *dissemblables* que réside, selon moi, la différence essentielle entre mon système et ceux de mes prédécesseurs. A de rares exceptions

près, j'ai pris les mêmes groupes d'éléments analogiques que ces derniers, mais avec l'intention d'étudier les lois des rapports entre les groupes.

- la série des halogènes au-dessous de celle des métaux alcalins

Li	Na	K	Rb	Cs
7	23	39	85,4	133

F	Cl	Br	I
19	35,5	80	127

- Les poids atomiques des éléments le plus nettement opposés au point de vue chimique que sont le sodium et le fluor, le potassium et le chlore, le rubidium et le brome, le césium et l'iode, ne diffèrent que de quelques unités. D'autre part, aucun élément connu ne peut être intercalé, quant à son poids atomique, entre ces « frères ennemis ».
- les éléments doivent se répartir de part et d'autre de ces deux rangées (ce qu'exprimera la première version du tableau), à moins qu'ils en soient encadrés par elles (c'est cette version, publiée dès 1871)
- Classement des éléments selon les poids atomiques croissants

Nom	Symbole	Poids	Type	Valence
<i>Lithium</i>	Li	7	métal	1
<i>Bore</i>	B	11	proche du métal	3
<i>Carbone</i>	C	12	intermédiaire entre métal et métalloïde	4
<i>Azote</i>	N	14	métalloïde	5
<i>Béryllium</i>	Be	14,1	métal	3
<i>Oxygène</i>	O	16	métalloïde proche du soufre	6
<i>Fluor</i>	F	19	métalloïde proche du chlore	7
<i>Sodium</i>	Na	23	métal	1
<i>Magnésium</i>	Mg	24	métal	2
<i>Aluminium</i>	Al	27,4	métal	3
<i>Silicium</i>	Si	28	intermédiaire entre métal et métalloïde	4
<i>Phosphore</i>	P	31	métalloïde	5
<i>Soufre</i>	S	32	métalloïde	6
<i>Chlore</i>	Cl	35,5	métalloïde	7

- succession régulière n'est interrompue que par deux fois : le bore trivalent succède au lithium monovalent, et le béryllium, métal trivalent, vient se placer après l'azote, métalloïde pentavalent
- ⇒ Si le béryllium était bivalent, son poids atomique serait de 9,4, ce qui rétablirait la continuité dans la progression de 1 à 7 de la valence.
- ⇒ le béryllium est très proche, par ses propriétés, du magnésium, du calcium et du baryum, qui sont des métaux bivalents.
- ⇒ Mendéléïev **rectifie hardiment** le poids atomique admis jusque-là pour le béryllium, le ramenant à 9,4 contre 14,1.
- ⇒ il est obligé de faire plus ou moins violence à 28 éléments sur 63.

- Loi périodique

*Les propriétés des corps simples, la constitution de leurs combinaisons, ainsi que les propriétés de ces dernières, sont des fonctions périodiques des poids atomiques des éléments.*

			Ti=50	Zr=90	?=180
			V=51	Nb=94	Ta=182
			Cr=52	Mo=96	W=186
			Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,4
			Fe=56	Ru=104,4	Ir=198
			Ni=Co=59	Pd=106,6	Os=199
H=1			Cu=63,4	Ag=108	Hg=200
	Be=9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112	
	B=11	Al=27,4	?=68	Ur=116	Au=197?
	C=12	Si=28	?=70	Sn=118	
	N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210?
	O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?	
	F=19	Cl=35,5	Br=80	J=127	
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133	Tl=204
		Ca=40	Sr=87,6	Ba=137	Pb=207
		?=45	Ce=92		
		?Er=56	La=94		
		?Yt=60	Di=95		
		?In=75,6	Th=118?		

#### RÉCEPTION DES TRAVAUX DE MENDELÉÏEV

– Ernest Rutherford

Au début, les idées de Mendeleïev retinrent peu l'attention, car les chimistes de son temps s'attachaient davantage à rassembler et établir des faits qu'à réfléchir aux rapports existant entre eux.

- • **Découverte du gallium** le 27 Août 1875 par Paul Emile Lecoq de Boisbaudran
- Mendéléïev constate que les propriétés du gallium correspondent à celles de l'elkaaluminium dont il avait supposé l'existence dès 1871
- Rappelle les conséquences de la loi périodique

La loi périodique indique les lacunes qui existent encore dans le système des éléments connus, et permet de prévoir les propriétés des éléments inconnus, ainsi que celles de leurs combinaisons. Ainsi, par exemple, il y a deux lacunes, dans les groupes III et IV de la cinquième série. J'ai nommé ces éléments à découvrir *ekaaluminium* El et *ekasilicium* Es.

– gallium = ekaaluminium

Si les recherches ultérieures confirment l'identité des propriétés que je viens d'indiquer pour l'ekaaluminium avec celles du gallium, ce sera un exemple instructif de l'utilité de la loi périodique.

– Réponse de Lecoq de Boisbaudran

En Mai 1876, j'essayai de mesurer la densité du gallium sur un échantillon de 6 centigrammes ; j'obtins 4,7 à 15 degrés (et relativement à l'eau à 15 degrés). La moyenne des densités de l'aluminium et de l'indium étant 4,8 (à 5,1), le poids spécifique provisoirement trouvé pour le gallium paraissait pouvoir s'accorder assez bien avec une théorie plaçant ce métal entre l'indium et l'aluminium. Cependant les calculs établis par M. Mendeleef pour un corps hypothétique qui semble correspondre au gallium (du moins d'après ses propriétés) conduisaient au nombre 5,9.

Le gallium cristallisé sous l'eau, décrépite quelque fois quand on le chauffe. Peut-être mon premier métal contenait-il des vacuoles remplies d'air ou d'eau. J'ignore si cette cause d'erreur s'est jointe ou non à d'autres pour fausser ma première détermination ; quoi qu'il en soit, je l'évitai depuis en chauffant fortement le métal et le solidifiant dans une atmosphère sèche. J'obtins alors des densité plus élevées, variant néanmoins de 5,5 à 6,2 tant que le poids des prises d'essai ne dépassa pas quelques centigrammes.

Je viens enfin d'opérer avec 58 centigrammes de gallium provenant de la réunion de six échantillons.

TAB. 1 – Comparaison entre les propriétés de l’ekaaluminium (Ea) prédites par Mendéléïev en 1871 et les propriétés du gallium (Ga) établies expérimentalement par Lecoq de Boisbaudrant à partir de 1875. Mendéléïev avait prédit sa découverte par analyse spectrale, comme le fit Lecoq de Boisbaudrant.

	ekaaluminium	gallium
Poids atomique	$\approx 68$	69,9
Densité	5,9	5,96
Point de fusion	bas	30°
Formule des composés	$\text{EaCl}_3, \text{Ea}_2\text{O}_3, \text{Ea}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{GaCl}_3, \text{Ga}_2\text{O}_3, \text{Ga}_2(\text{SO}_4)_3$

– Conclusions malgré tout mitigée par Lecoq de Boisbaudran

La prévision de Mendeleev est ainsi exactement vérifiée.

Parmi les nombreux hypothétiques éléments indiqués par l’ingénieuse classification de Mendeleev, il y en a une qui semble se référer au gallium parmi les propriétés calculées [...]

Je dois dire que je ne connaissais pas la description donnée par Mendeleev pour cette hypothétique élément. Je devrais même ajouter que mon ignorance m’a peut-être été favorable, dans le sens où j’aurais perdu du temps si j’avais cherché le gallium dans les précipités formés par l’ammoniac et non les solutions d’ammoniac, qui le retienne complètement, ou presque complètement lorsqu’il est présent en petite quantité.

Le point de fusion du gallium assez bas semble également difficile à réconcilier avec ce que la théorie permet de prévoir.

Ainsi, en dépit des incontestables mérites de l’hypothèse de Mendeleev, plusieurs réactions et qualités du nouveau métal diffèrent suffisamment de ce que la théorie indique pour avoir rendu tout de même problématiques les recherches si elles avaient été seulement guidées par cette théorie [...]

Par conséquent, il me semble probable que ni les calculs de Mendeleev ni mes propres hypothèses aurait conduit à la connaissance du gallium durant longtemps sans la méthode expérimentale particulière que j’ai suivi.

Cependant, la découverte d’un nouveau métal investit maintenant les classifications, nous permettant de prévoir l’existence d’éléments inconnus, avec une importance qui ne leurs aurait pas été accordée si aucun fait positif n’était venu supporter ces idées. Il n’est pas besoin d’insister, je crois, sur l’extrême importance qui s’attache à la confirmation des vues théoriques de M. Mendeleeff concernant la densité du nouvel élément.

– Réaction de Gaston Tissendier en 1876

Si les théories de M. Mendeleeff présentent encore des points obscurs, la découverte du gallium vient leur donner une confirmation trop sérieuse pour qu’elles ne soient considérées dès à présent comme une des conceptions les plus remarquables de notre époque.

– A la fin de sa note à l’Académie de Paris, Mendéléïev invitait à la recherche de l’ekaasilicium :

On doit espérer que la découverte de l’ekasilicium  $\text{Es}=72$  ( $\text{EsO}_2$ ), dont les propriétés présumées sont décrite dans le *Journal de Liebig*<sup>12</sup>, ne tardera pas à être réalisée. On doit le chercher, avant tout, près de l’arsenic et du titane.

– ● **Découverte du scandium** en Mars 1879 par Lars Fredrik Nilson (1840-1899)

– A l’issue de ce premier travail, Nilson sait uniquement que le poids atomique du scandium est inférieur à 90, ajoutant *que le poids atomique du scandium ne sera pas notablement inférieur au minimum qu’on atteint pour le moment.*

– finalement, Nilson parvint à la conclusion

le poids atomique du scandium est égal à 44 ; c’est celui que M. Mendeleeff a attribué à l’élément prédit *ekabore* ; les découvertes du scandium et du gallium confirment les spéculations de ce savant, qui a su prédire l’existence de ces éléments et en déterminer d’avance les propriétés principales.

– ● **Découverte du germanium** en 1885 par Clemens Winkler (1838-1904)

<sup>12</sup>D. Mendéléïev, *Journal de Liebig*, suppl. Band VIII, p. 171.

TAB. 2 – Comparaison entre les propriétés de l’ekabore (Eb) prédites par Mendéléïev en 1871 et les propriétés du scandium (Sc) établies expérimentalement par Nilson en 1879-1880. Mendéléïev avait prédit sa découverte par analyse spectrale, comme le fit Nilson.

	ekabore	scandium
Poids atomique	44	44,01
Densité de son oxyde	$\text{Eb}_2\text{O}_3$ : 3,5	$\text{Sc}_2\text{O}_3$ : 3,864
Apparence	sels incolores	sels incolores
Solubilité	insolubilité dans les bases	insolubilité dans les bases

- analyse de la composition de l’argyrodite, un minerai riche en argent et d’apparence inhabituelle trouvée à Himmelsfurst Fundgrube près de Freiburg

Mercure	< 0,21%
Argent	de 73 à 75 %
Soufre	de 17 à 18 %
Fer	petites quantités
Arsenic	traces

- total de 93% de la masse
- impossible de découvrir la part manquante suivant la procédure habituelle
- 6 Février 1886

Après plusieurs semaines de recherches pénibles, je peux maintenant établir définitivement que l’aryrodite contient un nouvel élément, très proche de l’antimoine, et qui en est difficilement distingué de lui. Le nom de « germanium » devrait lui être donné. Sa découverte fût établie avec **beaucoup de difficultés** et de **doutes pénibles** parce que les minéraux qui accompagnaient l’argyrodite contenaient de l’arsenic et de l’antimoine ; leur grande ressemblance avec le germanium et l’absence de méthode de séparation fût extrêmement **perturbante**.

- finalement

La similitude entre les comportements des minerais d’argyrodite et d’antimoine [...] conduisent à l’hypothèse que le nouvel élément contenu dans l’argyrodite doit être proche de l’antimoine du point de vue de ses propriétés chimiques, et que sa place dans le système périodique devrait être entre l’antimoine et le bismuth ; bref, qu’il doit être l’ekaantimoine [ou ekasilicium] de Mendéléïev.

- lettre à Mendéléïev (26 Février 1886)

je me borne à vous informer d’un nouveau triomphe très probable de votre géniale étude

## 2.2 Aimants et magnétisme

Depuis la haute Antiquité (Thalès)

- Un morceau d’ambre (*ēlektron, ηλεκτρον*), lorsqu’il est frotté avec une peau, acquiert le pouvoir d’attirer des cheveux ou autres petites particules de matière.
- une espèce de pierre, associée à la ville de Magnésie en Ionie, a la vertu d’attirer les petits morceaux de fer.
- PLATON, *Timée* :
  - étonnants phénomènes d’attraction que produisent l’ambre et la pierre d’Héraclée <sup>13</sup>.
  - L’attraction n’intervient jamais dans aucun de ces effets.

<sup>13</sup>C’est-à-dire l’aimant naturel.

TAB. 3 – Comparaison entre les propriétés de l’ekasilicium (Sc) prédites par Mendéléïev en 1871 et les propriétés du germanium (Ge) établies expérimentalement par Winkler en 1885-1886.

	ekasilicium	germanium
Poids atomique	72	72,32
Poids spécifique	5,5	5,469 (à 20,4°)
Volume atomique	113	113,3
Valence	4	4
Poids spécifique de	EsO <sub>2</sub> : 4,7	GeO <sub>2</sub> : 4,703
Point d’ébullition de	EsCl <sub>4</sub> : < 100°	GeCl <sub>4</sub> : ≈ 80°
Combinaison organo-métallique	Es(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub>	Ge(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub>
Point d’ébullition de	Es(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> : 160°	Ge(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> : 160°
Poids spécifique de	Es(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> : 0,96	Ge(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> : un peu plus léger que l’eau

- Au moyen-âge, cette pierre fût appelée aimant, du grec *adamas* (αδαμας), qui veut dire « acier ».
- BEDE (673-735), un moine anglais :
  - le jais *comme l’ambre, lorsqu’il est chauffé par frictions, s’accroche à tout ce qui lui est appliqué*
  - rôle attribué à la chaleur selon la conception de Bede.
  - D’autres substances telles que le verre, le soufre, la cire et les pierres précieuses ont manifesté des propriétés similaires
- les phénomènes électriques ne sont pas vraiment étudié avant le XVII<sup>e</sup> siècle, mais les phénomènes magnétiques furent le sujet de beaucoup d’écrits en raison du rôle joué dans le fonctionnement de la boussole. L’invention est due aux chinois, qui la transmettent aux Arabes.
- Pierre de MARICOURT — en latin, Petrus Peregrinus — étudia les propriétés de l’aimant
  - Il expliqua comment identifier les pôles nord et sud d’un aimant.
  - Il affirma qu’un aimant brisé en deux ne donne pas un pôle nord et un pôle sud séparés, mais deux nouveaux aimants avec deux pôles opposés chacun.
  - Il compare la pierre d’aimant à la sphère céleste
- William GILBERT (1544-1603), *De magnete*, 1600.
  - Il introduit le terme *électrique* — *electricus* dans son texte latin — d’après le mot grec *électron* (ηλεκτρον) pour l’ambre <sup>14</sup>.
  - sont qualifiés d’*électriques* les *corps qui attirent de la même manière que l’ambre*. Il distingue la propriété électrique de la propriété magnétique <sup>15</sup> :
  - considère la pierre d’aimant comme la matière terrestre par excellence et propose que la Terre elle-même soit un gigantesque aimant.
  - Comme Maricourt, il propose de tailler la pierre d’aimant en forme de sphère (*terrella*, petite terre) en analogie avec la Terre.
  - Explication du principe de la boussole
    - Le long du cercle équatorial A, il n’y a pas d’érection des extrémités d’un bout de fil de fer avec la *terrella* ; aux pôles, l’érection est très forte.
    - plus grande est la distance au plan équatorial, plus grande est l’érection avec la *terrella*, et ce en chacune de ses parties, et non pas seulement avec les pôles.
    - Mais les bouts de fer ne sont pas faits pour rester en place en raison d’une force attractive particulière ou toute autre force combinée ; mais en raison d’une énergie qui leur donne direction, conformité et rotation.
    - Pour la région B, le moindre morceau de fer pesant presque rien ne peut être dressé à la perpendiculaire par le plus fort des aimants, mais adhère obliquement.
    - [En A, la *terrella*] maintient et soulève du sol deux onces [ 28,35 grammes] de fer solide ; mais est encore incapable d’ériger un morceau de fer pesant deux grains [ 0,065 grammes] ;

<sup>14</sup>W. Gilbert, *De magnete* (1600), English translation by P. Fleury Mottelay (1893), Dover.

<sup>15</sup>W. Gilbert, *Ibid*, p. 75.

ceci ne serait pas ainsi si la verticalité provenait d'une forte attraction,

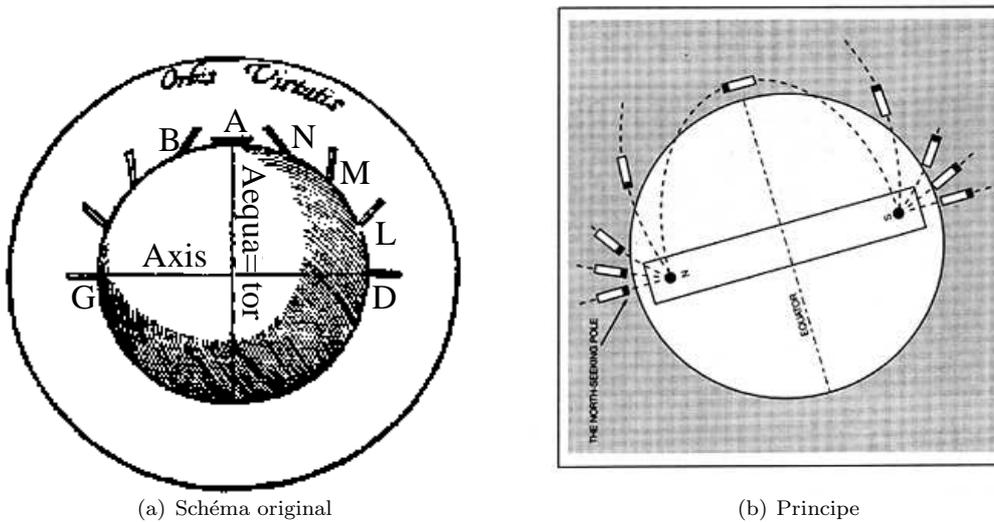
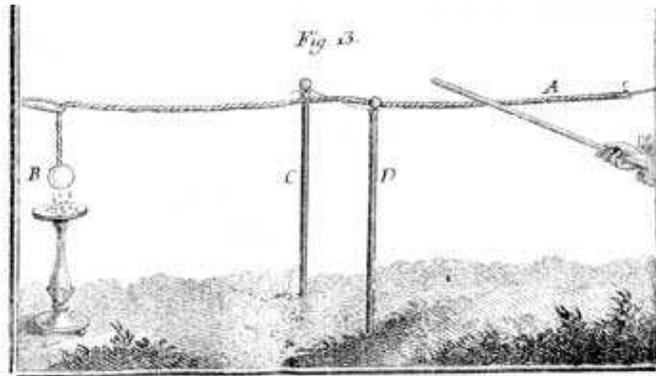


FIG. 5 – Schema de la Terrella utilisée par Gilbert.

- « Pour d'autres corps il est constaté une capacité considérable d'attraction, différent de celle de la pierre chargée, — l'ambre, par exemple »
- comme le pensait Galien (129-199) et Ibn Sinna (Avicenne), Gilbert voit l'électricité comme l'une des trois attractions :
  1. l'attraction exercée par ces corps qui s'attirent par une qualité élémentaire — à savoir la chaleur ;
  2. l'attraction exercée par ces ceux qui s'attirent par précipitation dans un vide ;
  3. l'attraction exercée par ces ceux qui s'attirent en raison d'une propriété due à toute leur masse :
- puisqu'observée dans substances très différentes, l'électricité ne peut être une propriété intrinsèque
- plutôt une sorte de fluide — ou d'effluve — qui serait produite ou transférée lorsque des corps étaient frottés l'un contre l'autre, et ensuite propagée aux objets proches.
- Explication du XVIII<sup>e</sup> : L'ambre et l'aimant n'attirent pas, à proprement parler, mais des effluves échappés de leurs pores effectuent un circuit et poussent vers eux les corps avoisinants. Il faut préalablement frotter l'ambre pour en déboucher les pores ; le fer seul est attiré par l'aimant, car il a la densité requise pour que les effluves de l'aimant ne puissent ni glisser sur lui, ni le traverser.

Stephen GRAY (1667-1736)

- En 1727, il distingua ainsi deux types de matériaux,
  - les **conducteurs** : le bois, le chanvre, les métaux
  - les **isolants** : le verre, la résine et la soie
- Expérience : si l'on frotte un tube de verre creux fermé par un bouchon de liège, celui-ci prend la propriété électrique, bien qu'il soit incapable de l'acquérir lorsqu'on le frotte directement, mais en le tenant à la main.
- Il fit également l'expérience suivante : il attachait au bouchon une corde de chanvre dont la longueur était de 765 pieds, il la tendait horizontalement en la suspendant par des rubans de soie au plafond d'une salle. Toutes les fois qu'on frottait le tube de verre, on voyait l'action électrique s'exercer sur toute l'étendue de la corde.
- Il effectua ensuite des expériences reliant les corps par des fils métalliques



Expérience de Stephen Gray sur la conduction (1729).

- L'électricité peut donc être distinguée du corps qui la produit
- la nature de l'électricité peut être soit attractive, soit répulsive : il n'était donc pas clair si l'électricité est unique ou double.

En 1733, Charles-François DE CISTERNAÏ DU FAY (1698-1739) découvre l'existence de deux types d'électricité<sup>16</sup> :

- On frotte un tube de verre pour le rendre électrique, et, le tenant dans une situation bien horizontale, on laisse tomber dessus une parcelle de feuille d'or. Sitôt qu'elle a touché le tube, elle est repoussée en haut, à la distance de 8 ou 10 pouces et elle demeure presque immobile en cet endroit.
- les corps devenus électriques sont chassés par ceux qui les ont rendus électriques car lorsqu'on laisse tomber la feuille sur le tube, il attire vivement cette feuille qui n'est nullement électrique, mais dès qu'elle a touché le tube elle est rendue électrique elle-même et, par conséquent, elle en est repoussée, et s'en tient toujours éloignée.
- deux sortes d'électricités sont distinguées : « je ne puis me dispenser de leur donner des noms différents [...] J'appellerai donc l'une électricité *vitree*, l'autre électricité *résineuse* parce que le verre et le copal sont les deux matières qui m'ont donné lieu de découvrir ces deux différentes. »

Benjamin FRANKLIN (1706-1790) : hypothèse

- il n'y a qu'une sorte de fluide électrique, dont tout corps possède une quantité équilibrée<sup>17</sup>.
- Tous les corps contiennent, à l'*état neutre*, une quantité déterminée de ce fluide :
  - si celle-ci augmente, les corps sont électrisés *positivement*, et possèdent les propriétés de l'électricité vitrée ;
  - si elle diminue, les corps sont électrisés *négativement*, et présentent les propriétés de l'électricité résineuse.

– Ceci sera repris par Jean-Antoine NOLLET (1700-1770)

Luigi GALVANI (1737-1798) disséquait des grenouilles.

- il œuvrait sur une grenouille alors qu'une machine électrostatique était en marche sur la même table
- Il constata alors que les muscles de la grenouille (morte) se contractaient violemment lorsqu'un scalpel entra en contact avec les nerfs, au moment où la machine se déchargeait
- Galvani répète l'expérience de multiples façons, par exemple en suspendant la grenouille à un crochet de cuivre relié à un paratonnerre
- Un jour de beau temps, comme l'orage ne vient pas, il suspend le crochet de cuivre à un balcon de fer et observe des contractions
- Il montra également que lorsqu'un nerf et un muscle touchaient deux métaux différents (du cuivre et du fer) en contact l'un avec l'autre, une contraction du muscle survenait, même sans machine à électricité statique aux abords : il en conclut qu'il y avait une différence de potentiel entre la cuisse de grenouille et le rail de fer et que la cuisse de grenouille devait contenir de

<sup>16</sup>C.-F. du Fay, Quatrième mémoire sur l'électricité, de l'attraction et de la répulsion des corps électriques, 1733.

<sup>17</sup>B. Franklin, *Experiments and observations on electricity*, 1774.

l'électricité.

- Galvani vient de découvrir la pile électrique !
- Les cuisses de grenouille se contractent même lorsqu'elles sont isolées et aussi longtemps que leurs nerfs restent reliés au sol tandis qu'une machine électrique produit à quelque distance une étincelle

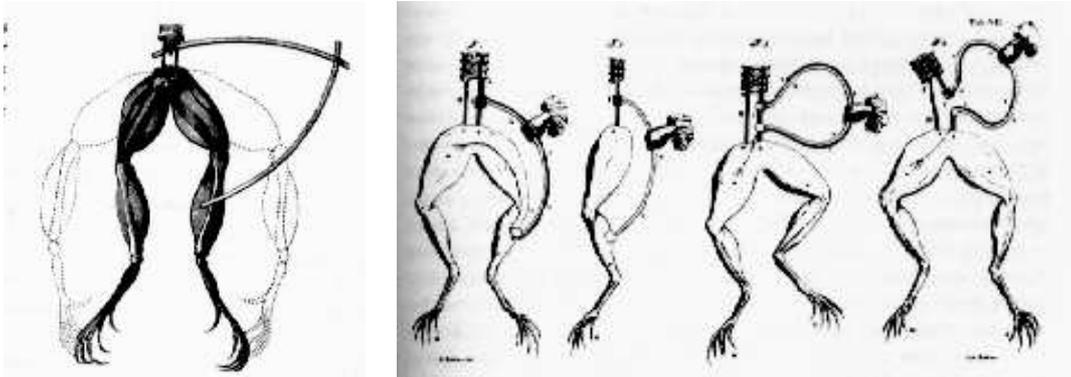


FIG. 6 – Différentes expériences de Luigi Galvani.

Alessandro VOLTA (1745-1827) n'acceptait pas l'idée que l'électricité puisse venir des tissus vivants

- Dans la plupart des expériences de Galvani, les muscles de grenouille étaient montés sur des supports de cuivre et une contraction musculaire était causée lorsqu'un métal différent était utilisé pour déclencher un arc électrique.
- Volta substitua les grenouilles « détecteurs » par un électromètre à condensateur
- En 1800, il annonça un nouvel appareil électrique, la pile voltaïque, initialement présentée comme un « *organe électrique artificiel* »
- appareil fait successivement de disques de zinc et de cuivre, chaque pair étant séparées par de l'étoffe imbibée d'eau salée
- Attacher un fil à chaque extrémité produisait un courant continu de faible intensité
- En 1801, il présenta ses travaux à Napoléon <sup>18</sup> (Fig. 7).



FIG. 7 – Schéma de piles voltaïques. En 1801, Volta, accompagné de Brugnatelli, montra ses travaux à Napoléon à qui il lut sa *dissertation sur l'identité de l'électricité avec les fluides galvaniques*.

<sup>18</sup>A. Volta, *Memoria sull'identità del fluido elettrico col fluido galvanico*, 1801.

## 2.3 L'électrochimie

Humphrey Davy (1778-1829) développe l'électrochimie

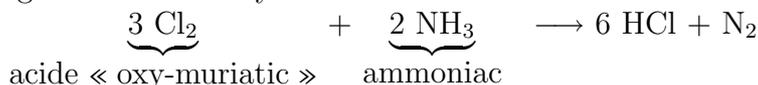
- En 1800 première décomposition chimique par l'électricité obtenue par Nicholson et Carlisle
- Extraction de l'hydrogène et de l'oxygène à partir de l'eau et décomposèrent des solutions aqueuses de différents sels usuels
- les forces électriques peuvent agir seulement lorsque l'électrolyte est capable d'oxyder l'un des métaux, et que l'intensité de l'effet — le voltage induit — est directement reliée à l'activité des électrolytes avec le métal
- Davy émit l'hypothèse que les éléments d'un composé chimique pouvaient être maintenus ensemble par des forces électriques :

Dans l'état actuel de nos connaissances, il serait inutile de spéculer sur la moindre cause de l'action à distance de l'énergie électrique [...]; sa relation à l'affinité chimique est, cependant, suffisamment évidente. Peut-être ne lui est-elle pas identique, et une propriété essentielle de la matière ?

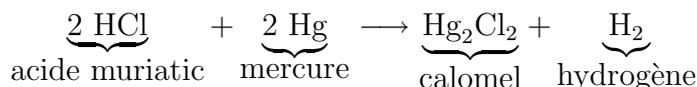
- Premières expériences de Davy pour tenter d'identifier les constituants d'un composé :

Aussi tôt qu'en 1800, j'ai trouvé que lorsque des portions séparées d'eau distillée, remplissant deux tubes de verre, reliés par des vessies humides, ou toutes autres substances humides animales ou végétales, étaient soumises à l'action électrique de la pile Volta par l'intermédiaire du fil d'or, une solution « nitro-muriatic » d'or apparaissait dans le tube contenant un fil positif, ou le fil transmettant l'électricité, et une solution de soude dans le tube opposé ; mais j'ai rapidement établi que l'acide « muriatic »<sup>19</sup> devait son existence à la matière animale ou végétale employée ; en effet, lorsque les mêmes fibres de coton sont utilisés dans des expériences successives, et lavées après chaque processus dans une solution d'acide nitrique, l'eau dans l'appareil les contenant, bien qu'ayant agit sur elles durant fort longtemps et avec une grande puissance, n'a finalement produit aucun effet sur le nitrate d'argent

- Premières séparations des métaux par électrolyse de solutions aqueuses d'alcalins
- Davy connaissait l'importance que Lavoisier portait à l'oxygène comme constituant des acides
- ⇒ aucune trace d'oxygène trouvée...
- Etude du mélange de l'acide « oxy-muriatic » avec l'ammoniac



- recherche l'oxygène sous forme de  $\text{CO}_2$  ⇒ échec
- Davy conclut qu'il s'agit de la « chlorine » de « chloros » signifiant vert-jaune
- Etude de la réaction



- fin de la théorie de Lavoisier selon laquelle l'oxygène était un constituant essentiel des acides
- Il tenta de faire passer des courants à travers des composés en fusion, et sa tenacité fut récompensée lorsqu'il fut capable de séparer des morceaux de métal pur.
- Premier succès en 1807 : séparation du potassium à partir de la potasse en fusion et du sodium à partir de sels communs.
- Il décrit le potassium comme une particule.
- Avec ce procédé, il découvra le magnésium, le calcium, le strontium et le barium en 1808.

Michael FARADAY (1794-1867)

- fils d'un ouvrier forgeron.
- Son instruction se limita aux rudiments de la lecture, de l'écriture et de l'arithmétique.
- À l'âge de quatorze ans, il était en apprentissage chez un relieur et libraire qui le familiarisa avec l'univers des livres.

<sup>19</sup>Egalement appelé *acide marin* : il s'agit de l'acide chlorhydrique.

- Il lut par hasard dans un exemplaire de l'*Encyclopedia Britannica* destiné à la reliure l'article *Electricity*. De là naquit sa passion pour la science.
- En 1812, l'un des clients de son patron l'emmène suivre les cours Humphrey Davy

Lorsque j'étais encore apprentis relieur, j'aimai beaucoup les expériences et l'idée d'exercer un métier m'inspirait une vive répugnance. Or il arriva qu'un membre de la *Royal Institution* m'enmena entendre les dernières leçons d'un cours professé par Humphrey Davy dans Albermale Street. Je pris des notes que je recopiai ensuite avec soin dans un volume in-quarto. J'éprouvais alors un désir que je regardais comme un sentiment égoïste et presque coupable, — celui d'échapper aux travaux de mon métier afin de m'enrôler sous le drapeau de la science ; car je m'imaginai que la science devait rendre aimable et généreux tous ceux qui la cultivent. Aussi pris-je la résolution hardie d'écrire à sir Humphrey Davy pour lui faire connaître mon souhait et exprimer l'espoir qu'il voudrait bien m'aider à le réaliser si l'occasion se présentait. Sa réponse ne se fit pas attendre. [...] au commencement de 1813 il m'engagea à l'aller voir et me parla d'une place d'aide-préparateur vacante dans la *Royal Institution*. Tout en contribuant à satisfaire mes aspirations scientifiques, il me conseilla de ne pas renoncer à la perspective que j'avais devant moi, me disant que la science est une rude maîtresse et que, pécuniairement parlant, elle récompense mal ceux qui se voue à son service. L'idée que j'avais conçue de la supériorité morale des savants le fit sourire, et il ajouta qu'il laisserait à l'expérience de quelques années le soin de m'éclairer à cet égard. <sup>20</sup>

- Davy a adressé sa réponse le 24 Décembre 1812 :

Monsieur... Je suis bien loin d'être placé fâché de la marque de confiance que vous me donnez, car elle fournit en même temps la preuve non seulement d'un zèle peu commun, mais d'une grande force de mémoire et d'attention. Je suis obligé de quitter Londres et je ne m'y trouverai installé de nouveau que vers la fin de Janvier ; je vous verrai alors au moment qui vous conviendra le mieux. <sup>21</sup>

- Faraday est engagé comme aide-préparateur au laboratoire de la *Royal Institution of Great Britain* en Mars 1813
  - dès le mois d'Octobre, il est le secrétaire de Davy.
  - En 1824, il devient membre de la *Royal Society*.
  - En 1825, il devient directeur de ce laboratoire
- Vers 1830, Michael Faraday (1791-1867) insiste sur la nécessité d'introduire de nouveaux termes
- Cf. le soucis de nomenclature de Lavoisier

La théorie **que je crois être une vraie expression** des fait de la décomposition électrochimique, et que j'ai par conséquent détaillé dans une série précédente de ces *Recherches*, est si différentes des théories avancées auparavant que j'ai éprouvé de grandes difficultés en exposant ces résultats qui sont, comme je le pense, corrects, limité que j'étais à l'utilisation de termes qui sont actuellement avec une certaine signification acceptée. De ce type est le terme *pôle*, avec ses préfixes de positif et négatif, et les idées d'attraction et de répulsion qui lui sont associées. La phraséologie générale est que le pôle positif *attire* l'oxygène, les acides, etc., ou plus prudemment, qu'il *détermine* leur évolution à sa surface ; et que le pôle négatif agisse d'une manière égale sur l'hydrogène, les combustibles, les métaux, et les bases. Selon mes pensées, la force déterminante n'est pas aux pôles, mais *au sein* des corps en décomposition ; et l'oxygène et les acides se rendent à l'extrémité *negatives* des corps tandis que l'hydrogène, les métaux, etc. sont récupérés à l'extrémité *positive*.

Par conséquent, de manière à éviter la confusion et la circonlocution, et par soucis d'une plus grande précision que je ne pourrais obtenir autrement, j'ai délibérément considéré le sujet avec deux amis, et avec leur assistance et concours dans leur conception, je propose ainsi l'utilisation de quelques autres termes que je vais maintenant définir. Les *pôles*, comme ils sont habituellement appelés, sont seulement des portes ou des voies par lesquelles le courant électrique passe au sein ou hors des corps se décomposant ; et naturellement, lorsqu'ils sont au contact avec ces corps, ils sont les limites de leur extension selon le courant. Les termes généralement appliqués aux surfaces métalliques en contact avec la substance en décomposition, sont sujets au doute. A la place du terme pôle, je propose d'utiliser celui d'*électrode* <sup>22</sup>, et je pense de cette façon que les substances, ou plutôt les surfaces, soit d'air, d'eau, de métal ou tout autre corps, qui délimitent l'extension de la matière en décomposition selon les courants électriques.

Les surfaces auxquelles, selon la phraséologie commune, les courants électriques entrent et quittent un corps en décomposition sont les places les plus importantes de l'action, et nécessitent d'être distinguées des pôles, comme

<sup>20</sup>M. Faraday, cité dans la notice bibliographique de H. Sainte-Claire Deville, in *Histoire d'une chandelle*, Ed. J. Hetzel, Paris, ≈ 1866.

<sup>21</sup>*Ibid.*

<sup>22</sup>From *ηλεκτρον* and *ὁδός*, une voie.

elles le sont la plupart du temps, et des électrodes, avec lesquelles elles sont toujours, en contact [...] L' *anode*<sup>23</sup> est par conséquent la surface à laquelle le courant électrique, selon notre expression, entre : c'est à l'extrémité *négative* du corps en décomposition que l'oxygène, le chlore, les acides, etc, sont impliqués. Elle est contre ou opposée à l'électrode positive. La *cathode*<sup>24</sup> est la surface à laquelle le courant quitte le corps en décomposition, et est son extrémité *positive*; les corps combustibles, les métaux, les alcalins, et les bases y sont impliqués, et c'est en contact avec l'électrode négative.

J'aurai également l'occasion dans ses *Researches*, de classer les corps selon certaines relations dérivées de leurs actions électriques; et espérant exprimer ces relations sans induire implicitement l'expression de toute vue hypothétiques, j'ai l'intention d'utiliser les noms et termes suivants. Plusieurs corps sont décomposés directement par le courant électrique, leurs éléments étant libres; je propose de les appeler *électrolytes*<sup>25</sup> [...]

Finalement, j'ai besoin d'un terme pour désigner ces corps qui peuvent passer entre les *électrodes*, ou, comme ils sont habituellement appelés, les pôles. Les substances sont fréquemment désignées comme étant *électro-négatives* ou *électro-positives*, selon la manière avec laquelle elles vont, sous l'attraction directe de la supposée influence du pôle positif ou négatif. Mais ces termes sont **trop significatifs** pour l'utilisation que je voudrai leur donner; pour cela, leurs significations sont peut être correctes, elles sont seulement hypothétiques, et peut être fausses; et alors, à travers une influence très imperceptible, mais encore très dangereuse car récurrente, ils portent préjudice à la science en réduisant et limitant les vues habituelles de celles impliquées en poursuivant ainsi. Je propose de distinguer de tels corps en les appelant *anions*<sup>26</sup> qui vont vers l'*anode* des corps en décomposition; et ceux passant vers la *cathode*, *cations*<sup>27</sup>; et lorsque j'aurai l'occasion de parler d'eux tous, je les appellerai *ions*. Ainsi, le chlorure de plomb est un *électrolyte*, et lorsqu'il est *électrolysé* impliquent les deux *ions*, le chlorure étant l'*anion*, et le plomb le *cation*.

Ces termes, une fois bien définis, me permettront, je l'espère, d'éviter beaucoup de périphrases et d'ambiguïtés d'expression. Je ne pense pas les utiliser plus fréquemment que nécessaire, car je suis bien conscient que leurs noms sont une chose, et la science une autre.

### Expériences d'électrochimie

- expériences réalisées sur de l'eau salée ou de solution acide (l'acide sulfurique a sa préférence)
- **Loi de Faraday**

*L'action de la décomposition chimique d'un courant est constante pour une quantité constante d'électricité, en dépit des plus grandes variations dans les sources, dans les intensités, dans la taille des électrodes utilisées, dans la nature des conducteurs (ou non-conducteurs) à travers lesquels il est posé, ou autres circonstances.*

- notion d'affinité : capacité électrique naturelle à chaque corps

*Les atomes des corps qui sont équivalents entre eux ont des qualités égales d'électricité qui leur sont naturellement associées.*

## 2.4 Naissance de l'électromagnétisme



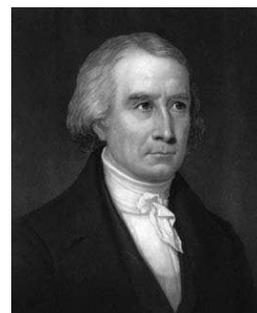
Hans Christian Oersted  
(1777-1851)



Jean-Baptiste Biot  
(1774-1862)



André-Marie Ampère  
(1775-1836)



François Arago  
(1786-1853)

En 1745, John MICHELL (1724-1793) publie un traité sur les aimants artificiel<sup>28</sup>.

<sup>23</sup>De *ανω*, vers le haut, et *όδός*, une voie.

<sup>24</sup>De *κατά*, vers le bas, et *όδός*, une voie.

<sup>25</sup>De *ηλεκτρον* et *λύω*, *solvo*. Nom, électrolyte; verbe, "électrolyser".

<sup>26</sup>De *ἀνίω*, *qui monte*. [Participe neutre.]

<sup>27</sup>De *κατιών*, *qui descend*.

<sup>28</sup>J. Michell, *A treatise of artificial magnets*, Cambridge, 1750.

- une méthode pour fabriquer les aimants.
- une intéressante exposition de la nature de l'induction magnétique.
- Énoncé de la loi selon laquelle la *force magnétique entre deux pôles* d'un aimant varie en  $d^{-2}$ .

Charles Augustin de COULOMB (1736-1806) publie sept mémoires sur l'électricité et le magnétisme entre 1785 et 1791.

- A l'aide d'une balance à torsion, de son invention, il étudie les lois d'attraction et de répulsion,
- ainsi que la distribution d'électricité à la surface de corps chargés,
- théorie de l'attraction et de la répulsion entre corps et démontre qu'une loi en raison inverse du carré des distance convient pour de telles forces.

*L'action répulsive de deux balles électrisées de la même nature d'électricité et placée à différentes distances était très exactement en raison inverse du carré des distances.*

- introduction du théorème de divergence nulle par Laplace en 1782 ( $\Delta V = 0$ ), Poisson la transpose et la complète à l'électricité :

$$\Delta V + \frac{\rho}{\epsilon_0} = 0$$

Ceci sera démontré rigoureusement par Gauss en 1839

- En 1810, redécouvrant le théorème de divergence de Lagrange (1764), Gauss énonça :

*Le flux sortant du champ électrique  $\vec{E}$  au travers d'une surface  $\mathcal{S}$  est proportionnel à la somme des charges électriques contenues à l'intérieur du volume défini par cette surface (et éventuellement des charges réparties sur cette surface).*

- Des expériences plus précises réalisées par Carl Friedrich GAUSS (1777-1855) confirmeront ces résultats.
- L'électrostatique sera achevée, du point de vue de ses principes, après l'introduction en 1772 du potentiel par Joseph-Louis LAGRANGE (1736-1813). Ce potentiel permet de représenter de manière plus commode les forces en fonction de la distance.

En 1820, Christian ORSTED (1777-1851) découvre que le courant en provenance d'une batterie électrique peut induire la déviation d'une boussole placée à proximité.

André-Marie AMPÈRE (1775-1836) quantifie cet effet <sup>29</sup>.

- Une semaine après avoir disposé d'une description des travaux d'Oersted, il a déjà complété l'essentiel de la théorie de l'électrodynamique,
- 9 Octobre 1820 il annonça que

*c'est sur ces considérations générales [de symétries] que j'ai construit une expression de l'attraction de deux courants infiniment petits, qui n'est à la vérité qu'une hypothèse, mais la plus simple qu'on peut adopter et celle par conséquent qu'on doit adopter.*

- Il procède à plusieurs expériences avec l'aide de Augustin Jean FRESNEL (1788-1827) et réussit à exprimer les phénomènes magnétiques à l'aide de phénomènes électriques — soit des courants électriques et des forces sur des fils les portant.
- Il montre qu'un aimant équivaut à une bobine de fil dans laquelle passe un courant (solénoïde).
- Il décrit la force magnétique entre deux fils et du sens des courants
- Il reproduit l'aimantation du fer par un courant électrique et développe l'électro-aimant.
- A la fin de son ouvrage, Ampère dressa une liste de propositions :

1. Sans qu'on soit autorisé à rejeter les explications fondées sur la réaction de l'éther mis en mouvement par les courants électriques, **rien n'oblige jusqu'à présent d'y avoir recours.**

---

<sup>29</sup>A.-M. Ampère, Théorie Mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Tome VI, 1827.

2. Les molécules des deux fluides électriques, distribuées sur la surface des corps conducteurs, sur la surface ou dans l'intérieur des corps qui ne le sont pas, et restant aux points de ces corps où elles se trouvent, soit en équilibre dans le premier cas, soit parce qu'elles y sont retenues dans le second par la **force coercitive des corps non conducteurs, produisent, par leurs attractions et répulsions réciproquement proportionnelles aux carrés des distances, tous les phénomènes de l'électricité ordinaire.**
  3. Quand les mêmes molécules sont en mouvement dans les fils conducteurs, qu'elles s'y réunissent en fluide neutre et s'y séparent à chaque instant, **il résulte de leur action mutuelle des forces** qui dépendent d'abord de la durée des périodes extrêmement courtes comprises entre deux réunions ou deux séparations consécutives, ensuite des directions suivant lesquelles s'opèrent ces compositions et décompositions alternatives du fluide neutre. Les forces ainsi produites sont constantes dès que cet état dynamique des fluides électriques dans les fils conducteurs est devenu permanent ; ce sont elles qui produisent tous les phénomènes d'attraction et de répulsion que j'ai découverts entre deux de ces fils.
  4. etc.
- En 1831, Faraday réalisa un dispositif formé d'un anneau de fer qu'entourent deux spires :
    - l'une est connectée à une pile voltaïque = vibration primaire, l'anneau concentrant la composante latérale
    - l'autre, situé à l'opposé, devait convertir les vibrations secondaires en courant électrique
    - Découverte de l'induction électromagnétique

Si un fil métallique est traversé par un courant, un autre fil métallique placé à côté de lui, mais séparé par un corps isolant, éprouve une influence au moment où l'on introduit le courant dans le fil principal : il se développe un courant en sens contraire dans le fil secondaire. Mais ce courant qu'on appelle *induit* cesse immédiatement, quoique le fil principal continue d'être promu par l'électricité. Le phénomène inverse se produit lorsque la circulation du courant est interrompue.

## 2.5 La synthèse de Maxwell

James Clerk Maxwell (1831-1879) reprend toutes les lois de l'électromagnétisme dues à Ampère, Laplace, Biot et Savart, Faraday, ...

Maxwell était profondément imprégné du sentiment de la symétrie mathématique. En aurait-il été de même si d'autres n'avaient, avant lui, recherché cette symétrie pour sa beauté propre ? C'est que Maxwell était habitué à penser en vecteurs et que si les vecteurs se sont introduits dans l'analyse, c'est par la théorie des imaginaires. Et ceux qui ont inventé les imaginaires ne doutaient guère du parti qu'on en tirerait pour l'étude du monde réel. Le nom qu'ils leur ont donné le prouve aisément <sup>30</sup>.

- construit un modèle mécanique
- introduit la notion de ligne de champs, découlant naturellement des recherches de Faraday (bien que non mathématisée par ce dernier)
- nécessité car les forces usuelles agissent en ligne droite, ce qui n'est pas le cas du potentiel électrique, magnétique, etc.
- Poincaré :

*il élève un grand nombre de constructions provisoires et indépendantes, entre lesquelles les communications sont difficiles et quelque fois impossibles*

- succès est dû à l'adjonction d'un terme qui, expérimentalement, est purement arbitraire parce que trop petit pour être infirmé ou confirmé par l'expérience  $\Rightarrow$  c'est le *courant de déplacement*.
- 20 équations pour décrire l'ensemble des phénomènes électro-magnétiques

---

<sup>30</sup>H. Poincaré, ??.

- en 1885, Oliver HEAVISIDE (1850-1925), ancien télégraphiste, réduit en 1885 aux quatre équations suivantes à l'aide d'une notation vectorielle qu'il a lui-même introduite :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \end{array} \right. \quad (1)$$

- De nombreuses interrogations sur l'existence de l'éther découlent des travaux de Maxwell... De là, naissent également le problème de la constitution des gaz et de la présence des raies lumineuses...

- Georg Johnstone Stoney (1868) : Sur le mouvement interne des gaz

*[...] les lignes de mouvements au sein d'un gaz de molécules sont ou ressemblent à des orbites. Tout ce que nous savons réellement sur elles est qu'elles sont périodiques, et que leurs périodes sont les mêmes que celles des ondes de lumière auxquelles elles donnent naissance. Mais il y a les mêmes avantages en parlant ainsi dans la langue d'une hypothèse définie, qui a été provisoirement adoptée par soucis de commodité, qu'il y a lorsque nous parlons d'ondes de lumière, leurs vibrations transverses, et l'éther luminifère, ...*

- notion de libre parcours moyen
- les molécules sont constitués d'éléments plus simples
- leur *vis viva* (énergie cinétique) dépend de la température
- les chocs répétés sur une paroi produisent la pression
- il y a un gaz est placé à la même température, à la même pression et dans un même volume, **il y a même nombre de molécules** mais leurs vitesses peuvent être différentes pour compenser les différences en masse (c'est la *vis viva* qui demeure constante)
- Deux types de mouvements moléculaires
  - les mouvements des molécules entre elles (les plus importants du point de vue de l'énergie)
    - les gaz sont transparents parce qu'ils sont grossiers, et *ils ne sont pas adéquates pour absorber ou développer des vibrations dans l'éther luminifère, excepté peut-être dans une petite proportion*
    - $\Rightarrow$  peu d'interactions lumière-matière à cette échelle
  - les mouvements internes
    - les molécules sont des petits systèmes en mouvement
    - Ces minuscules mouvements sont affectés par les molécules voisines seulement durant l'instant où le chemin d'une molécule est détournée par son approche d'une autre molécule
    - ce sont ces minuscules mouvement qui influencent l'éther, produisant ces raies brillantes qui constituent presque l'ensemble du spectre d'un gaz incandescent, et sont d'une manière correspondante, influencée par l'éther, absorbant les mêmes rayons.
    - mouvements réguliers (périodiques?) car raies fixes
    - mouvements complexes car beaucoup de raies
- Vision de Maxwell sur les molécules

Un atome est un corps qui ne peut être coupé en deux. Une molécule est la plus petite portion possible d'une substance. Personne n'a jamais vu ou tenu une simple molécule. La science moléculaire, par conséquent, est l'une de ses branches d'études qui joue avec des choses invisibles et imperceptibles par nos sens, et **qui ne peut être sujette à des expériences directes.**

[...] Prenons une portion de matière, disons une goutte d'eau, et observons ses propriétés. Comme toute autre portion de matière jamais vue, elle est divisible. Divisons là en deux, chaque portion apparaît garder

toutes les propriétés de la goutte originale, et parmi elles, celle d'être divisible. Les parties sont semblables au tout à tous les égards, exceptés sa taille absolue.

Maintenant, continuons de répéter le processus de division jusqu'à ce que les portions séparées soient si petites que nous ne puissions plus les percevoir ou les tenir. Nous n'avons encore aucun doute que la subdivision pourrait être appliquée au delà, si nos sens étaient plus précis et nos instruments plus délicats. Ainsi nous le pensons tous, mais vient maintenant la question *Cette division peut-elle être répétée à jamais ?*

Selon Démocrite et l'école atomiste, nous devons répondre par la négative. Après un certain nombre de divisions, la goutte sera divisée en un nombre de parts, chacune ne pouvant plus être sous-divisée au delà. Nous devons ainsi, par l'imagination, arriver à l'atome qui, comme son nom le signifie littéralement, ne peut être coupé en deux.

[...] Le chimiste moderne appelle chacune de ses parties une molécule d'eau. Mais ceci ne signifie pas un atome, puisqu'elle contient deux substances différentes, l'oxygène et l'hydrogène. Selon la doctrine reçue, dans chaque molécule d'eau il y a deux molécules d'hydrogène et une d'oxygène. **Si ce sont des atomes ultimes ou pas, je n'essaierai pas de décider.**

La molécule, bien qu'indestructible, n'est pas un corps rigide, mais est capable de mouvements internes, et **lorsqu'elles sont excitées elles émettent des rayons**, dont la longueur d'onde est une mesure du temps de vibration de la molécule.

Les longueurs d'onde des différents types de lumière peuvent être comparées à l'aide d'un spectroscope à mieux d'un dix-millième. De cette manière il a été établi, **non seulement que les molécules de chaque spécimen d'hydrogène de nos laboratoires avait le même ensemble de périodes de vibration**, mais encore que la lumière émise du soleil et des étoiles fixes avait le même ensemble de périodes de vibration.

**Aucun de ces processus de la Nature, depuis le temps où la Nature a commencé n'a produit la plus petite différence dans les propriétés de chaque molécule.** Nous sommes par conséquent incapables d'attribuer l'existence des molécules ou l'identité de leur propriété à l'opération d'une cause que nous appelons naturelle.

Ainsi, nous avons été conduit, tout au long d'une démarche strictement scientifique, tout près du point auquel la Science doit s'arrêter. Non que la Science ne soit interdite d'étudier le mécanisme intérieur d'une molécule qu'elle ne peut prendre en pièces, pas plus que d'étudier un organisme qu'elle ne peut mettre ensemble. Mais retraçant l'histoire de la matière, la Science est arrêtée lorsqu'elle s'assure, d'une part, que la matière a été faite, et d'autre part, qu'elle n'a pas été réalisée par aucun des processus que nous appelons naturels.

La Science est incompétente à raisonner sur la création de la matière elle-même à partir de rien. Nous avons atteint la limite ultime de nos facultés de pensée lorsque nous admettons que parce que la matière ne peut être éternelle et auto-existante elle doit avoir été créée.

C'est seulement lorsque nous contemplons, non la matière en elle-même, mais la forme dans laquelle elle existe vraiment, que notre pensée trouve quelque chose sur lequel elle peut se prononcer.

ar exemple, la forme et la dimension des planètes ne sont pas déterminées par aucune lors de la nature, mais dépendent d'une collocation particulière de matière. Il en est de même pour la taille de la terre, de laquelle le standard de ce qui a été appelé le système métrique a été dérivé. Mais ces grandeurs astronomiques et terrestres sont bien moindres en importance scientifique que celle des plus fondamentales de tous les standards qui forment la base du système moléculaire. Les courses naturelles, autant que nous le sachions, sont au travail qui tend à modifier, tant qu'elles ne détruisent pas, tous les arrangements et dimensions de la terre et de l'ensemble du système solaire. Mais dans la course des âges, des catastrophes sont apparues et pourraient encore apparaître dans les cieux, tandis que les anciens systèmes peuvent être dissouts et que les nouveaux systèmes peuvent être dissouts, et que les nouveaux systèmes évoluent vers leurs ruines, les molécules au delà desquelles ces systèmes sont construits — les pierres fondatrices de l'univers matériel — demeurent incassées et non vermoulues.

Elles continuent ce jour comme elles ont été créées, parfaites en nombre, en mesure et en poids, et des caractères ineffaçables imprimées en elles, nous pouvons apprendre que ces aspirations dans la précision de la mesure, la vérité dans le jugement, et la justice dans l'action, que nous reconnaissons parmi nos nobles attitudes en tant qu'hommes, sont nôtres parce qu'elles sont les constituants essentiels de l'image de Lui Qui au commencement créa, non seulement les cieux et la terre, mais la matière dont les cieux et la terre sont constitués.

## 3 Les décharges dans les gaz basse pression

### 3.1 Les premiers tubes à décharges

- En 1709, Francis HAUKS BEE (1666-1713) observa que, lorsque l'air à l'intérieur d'un récipient de verre était pompé jusqu'à la pression de  $\frac{1}{60}$  de la pression normale de l'air et que le récipient était attaché une source d'électricité par friction, une étrange lumière pouvait être vue à l'intérieur du verre



Johann Geissler  
(1815-1879)



William Crookes  
(1832-1919)



Johnstone Stoney  
(1826-1911)



Wilhelm Röntgen  
(1845-1923)

- En 1748, William WATSON (1715-1787) décrit une lumière à l'intérieur d'un tube à vide comme une « arche de lumière chatoyante ».
- D'autres observations furent observées par Jean-Antoine Nollet (1700-1770) et Gottfried Heinrich GRUMMONT (1719-1776), puis par Michael Faraday.
- Les tubes à vide remontent à Robert BOYLE qui commença à construire des pompes à vide.
- Johann Heinrich GEISSLER (1815-1879), maître verrier recruté en tant que mécanicien à l'Université de Bonn
  - établit un laboratoire de fabrication d'instruments de physique et de chimie
  - raffine les pompes à vide au mercure pour l'obtention de vides très poussés (1/100 de millimètre de mercure).
- En 1858, Julius PLÜCKER (1801-1868)<sup>31</sup> fait appel à sa dextérité pour la construction en série des tubes à gaz raréfiés, auxquels il a donné le nom de tubes de Geissler, quoique l'invention soit de John Peter GASSIOT (1797-1877)
- Geissler développa la soudure verre-métal afin d'insérer des électrodes en vue de l'étude des décharges électriques dans les gaz raréfiés
- En 1859, Plücker découvrit que l'aimant déviait les électrons du tube cathodique

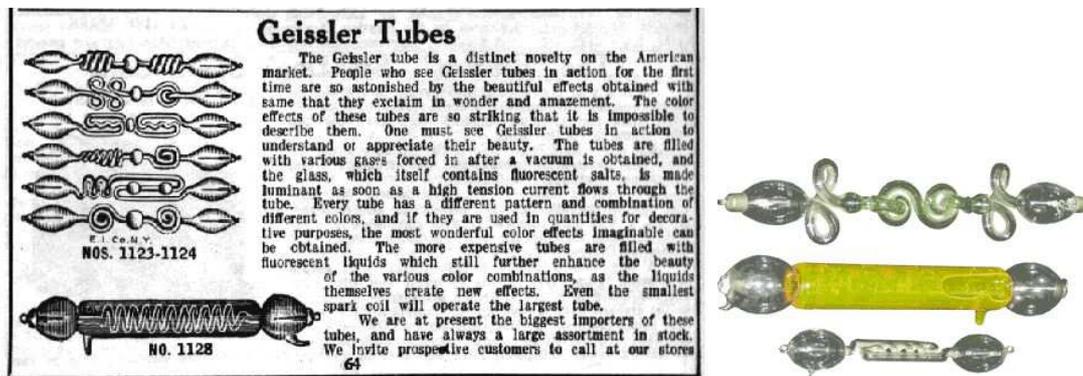


FIG. 8 – Publicité pour des tubes de Geissler dans le catalogue de 1914 de la *Electro Importing Company* de New York.

- Quelques années plus tard, Eugen GOLDSTEIN (1850-1930) introduit un nom pour ce phénomène : *Cathodenstrahlen*, ou *rayons cathodiques*.
- Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914) montra en 1869 que les électricité des deux signes ont des vitesses différentes.
- Il étudia également les spectres de lumière des gaz et vapeurs, et travailla sur le passage de l'électricité à travers des gaz.
- Des expériences semblables furent réalisées par William CROOKES (1832-1919)

<sup>31</sup>J. Plücker, *Pogg. Ann.*, vol. ciii, 1858.

- en conclut que les rayons étaient constitués de molécules de gaz qui prenaient une charge électrique négative au niveau de la cathode et en étaient alors violemment repoussées.
- Cromwell VARLEY, un proche de Crookes, avait déjà suggéré en 1871 que les rayons étaient *des particules de matière atténuée*, projetées par l'électricité du pôle négatif.
- les molécules de Crookes furent réfutées par Eugen Goldstein qui nota que les rayons cathodiques traversaient au moins 90 centimètres d'air au sein de tube avec des vides de  $\frac{1}{100\ 000}$  de la pression atmosphérique, alors que le libre parcours moyen d'une molécule ordinaire dans l'air à cette pression devait être de l'ordre de 0,6 centimètres.
  - ⇒ il s'agit de **particules beaucoup plus petites**
- Crookes accueillit avec enthousiasme la spectroscopie — introduite par Robert Bunsen (1811-1899) et Gustav Kirchhoff (1824-1887) alors professeurs à Heidelberg — qui repose sur les relations étroites existant entre les propriétés chimiques des éléments et leurs spectres caractéristiques.

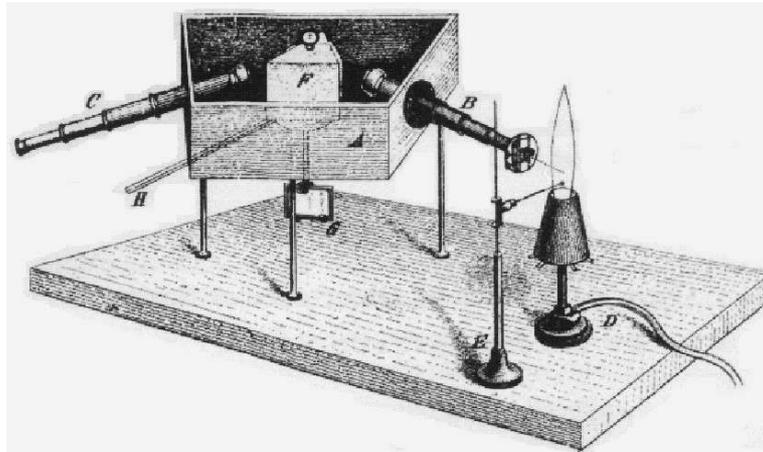


FIG. 9 – Appareillage utilisé pour l'observation des spectres. A est une boîte dont l'intérieur est noir avec un dessus trapézoïdal reposant sur trois pieds. Les deux côtés obliques, qui forment un angle d'environ  $58^\circ$  entre eux, supportent les deux petites télescopes B et C. L'oculaire du premier est retiré et remplacé par une plaque dans laquelle une petite fente formée par deux arêtes est ajustée au foyer de la lentille de l'objectif. La lampe D est placée devant la fente de manière l'axe de la flamme est sur l'axe du tube B. Entre les lentilles des télescopes B et C est placé un prisme F d'angle de réfraction  $60^\circ$ . Le prisme repose sur un plaque qui peut être tournée sur un axe vertical. Cet axe porte le miroir G à son extrémité inférieure.

- Crookes appliqua cette technique à l'étude des dépôts séléniteux obtenus à partir d'acide sulfurique.
  - Il découvra ainsi une raie verte inconnue dans le spectre.
  - Découverte du *thallium* en 1861 atomique, le thallium, isolé indépendamment par électrolyse par Claude-Auguste
  - découverte indépendante par Claude-Auguste Lamy (1820-1878)
- Crookes identifia la tension minimum entre les électrodes nécessaire pour produire une étincelle
- la tension diminuait avec la pression jusqu'à atteindre un certain minimum lorsque le tube était totalement vide.
- En 1873, il découvrit la répulsion qui pouvait résulter des rayons et en 1875 le phénomène qui sous-jacent à un petit instrument qui porte le nom de *radiomètre de Crookes* (Fig. 10a), dans lequel un système de pales, chacune noircie sur l'une de ses faces et polie sur l'autre, se met en rotation lorsqu'il est exposé à une énergie de radiation.
- Il ne parvint cependant pas à fournir une explication correcte de ce phénomène d'*attraction et répulsion résultant de la radiation*. C'est George Stoney qui en donna une interprétation fondée sur la cinétique des gaz, les molécules rebondissant plus fortement sur le côté le plus chaud des pales.
- Une bonne maîtrise des techniques du vide — de l'ordre de  $10^{-6}$  atmosphère — lui permet

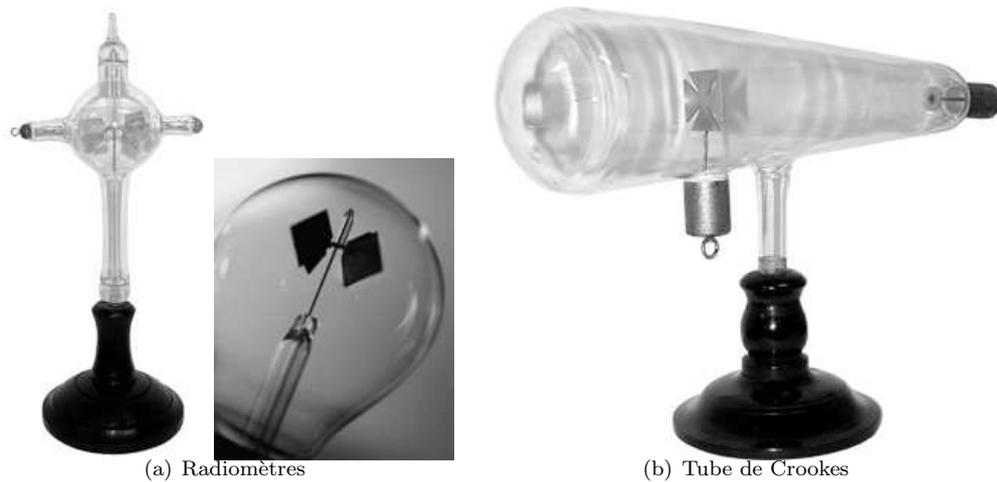


FIG. 10 – Deux radiomètres de Crookes (a) et tube de Crookes pour la démonstration de l'arrêt des rayons cathodiques par des objets métalliques. Le tube de Crookes était composé d'un tube en verre, fermé aux extrémités et relié à une pompe à vide. Deux électrodes étaient placées au sein du tube. Les électrodes pouvaient être reliées à une batterie ou à une source de tension. Celle-ci était augmentée jusqu'à ce qu'un courant soit détecté dans l'ampèremètre : on pouvait alors montrer que le courant (charge négative) passait de la cathode à l'anode.

de pouvoir en 1879 que le rayonnement est bien émis par la cathode : ceci est réalisé à l'aide d'un tube électronique à cathode froide, aujourd'hui appelé *tube de Crookes* (FIG.10b).

- répartition des charges au sein du tubes

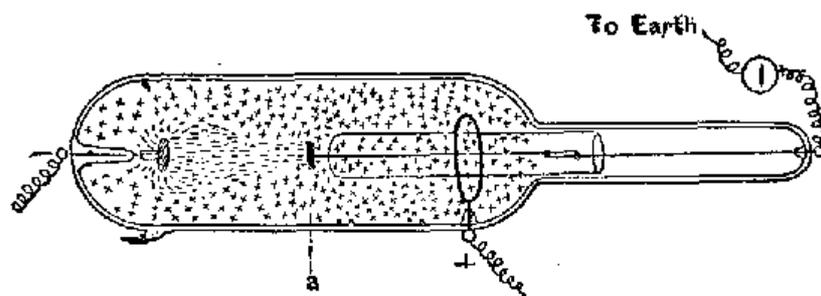
*Si un pôle inactif protégé en tout point sauf un par une fine enveloppe de verre, est placé au centre d'un faisceau moléculaire face à un pôle négatif, et que l'ensemble intérieur et extérieur du tube est enveloppé avec du métal, et mis à la terre de manière à ce que le transport de l'électricité soit la plus rapide possible, alors il est observé que les molécules quittant le pôle négatif et touchant le pôle inactif, transportent une charge négative durant leur voyage le long du tube et communiquent une électricité négative au pôle inactif.*

- Au fur et à mesure que le vide augmente, les charges positives augmentent au sein du tube : ceci entraîne le rapprochement du point neutre vers le pôle négatif.
- Le 22 Août 1879, Crookes fit une conférence à la *British Association* sur ce qu'il appelait la « matière radiante »

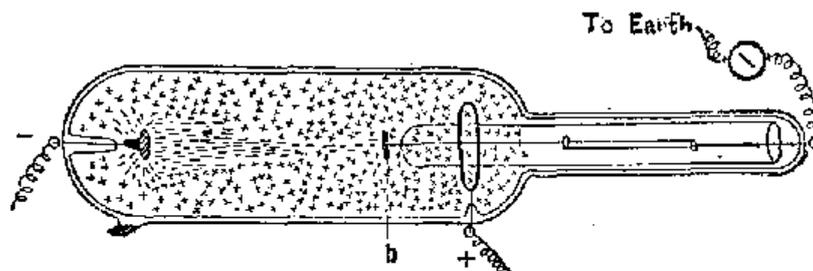
*Dans l'étude de ce quatrième état de la matière, il semble que nous ayons saisi et soumis à notre pouvoir les petits corpuscules indivisibles qu'il y a de bonnes raisons de considérer comme formant la base physique de l'Univers. Nous avons vu que, par quelques-unes de ses propriétés, la matière radiante est aussi matérielle que la table placée ici devant moi, tandis que, par d'autres propriétés, elle présente presque le caractère d'une force de radiation. Nous avons donc, en réalité, atteint la limite sur laquelle la matière et la force semblent se confondre, domaine obscur, situé entre le connu et l'inconnu, qui a toujours eu pour moi un attrait particulier. J'ose croire que les plus grands problèmes scientifiques de l'avenir trouveront leur solution dans ce domaine inexploré où se trouvent sans doute les réalités fondamentales, subtiles, merveilleuses et profondes.*

- Rudolf Clausius

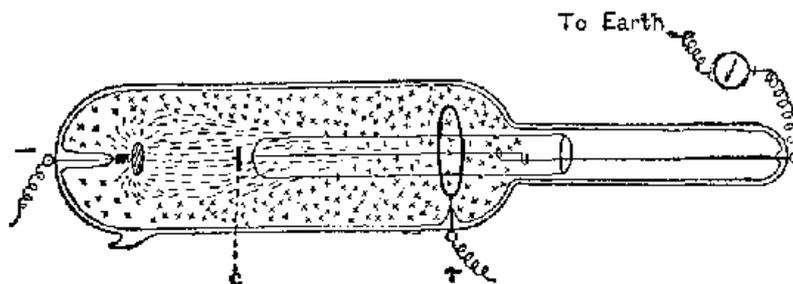
- étude de la théorie cinétique des gaz
- 1859 : notion de libre parcours moyen
- première estimation du nombre de molécules contenues dans un volume donné de gaz sous des conditions ordinaires de température et de pression
  - ⇒  $10^{19}$  molécules par  $\text{mm}^3$  de gaz



(a) Position a : aucune électricité au point neutre



(b) Position b : électricité positive



(c) Position c : électricité négative

FIG. 11 – Tubes de Crookes avec un pôle inactif en différentes positions. Selon sa position, l'électricité est nulle, positive ou négative. Le gaz est à une pression de 0,0001 mm.

• George Johnstone Stoney (1826-1911)

- il existe une charge unitaire portée par chaque ion
- 1880 : baptême de l'électron et première valeur de sa charge
- 1881 : loi de Faraday réinterprétée

*« Et, finalement, la Nature nous offre par le phénomène de l'électrolyse, une seule quantité définie d'électricité qui est indépendante du corps particulier sur lequel elle agit. Pour rendre cela clair, j'exprimerai la loi de Faraday dans les termes suivants, qui, comme je le montrerai, donnera toute sa précision, soit : — pour chaque liaison chimique qui est rompue au sein d'un électrolyte, une certaine quantité d'électricité, qui est la même dans tous les cas, traverse l'électrolyte. Cette quantité d'électricité précise, je l'appellerai  $E_r$ . Si nous en faisons notre quantité unitaire d'électricité, nous devrions avoir fait un pas important dans notre étude des phénomènes moléculaires. »*

- idem par Hermann Helmholtz (1881, soit la même année)

*« Maintenant la conclusion la plus surprenante de la loi de Faraday est peut-être ceci. Si nous acceptons l'hypothèse que les substances élémentaires sont composées d'atomes, nous ne pouvons éviter de conclure que l'électricité aussi, qu'elle soit positive ou négative, est divisée en portions élémentaires précises qui se comportent comme des*

*atomes d'électricité. Tant qu'elle se déplace dans un liquide électrolytique, chaque ion reste uni avec son équivalent ou ses équivalents électriques. A la surface des électrodes, une décomposition peut prendre place s'il y a une force électromotrice suffisante, et alors les ions perdent leurs charges électriques, et deviennent électriquement neutres. »*

– 1891 : Trois unités physiques fondamentales dans la Nature

1. la vitesse de « Maxwell », cette vitesse qui relie les unités électrostatiques avec les unités électromagnétiques dans un milieu dont la capacité inductive est l'unité et qui, dans le cadre de la théorie électromagnétique de la lumière est aussi le maximum de la vitesse de la lumière ;
2. la gravitation de Newton, ce coefficient de la gravitation universelle pour laquelle Charles Vernon Boys (1855-1944) a dernièrement réalisé une détermination si précise.
3. la charge minimum d'électricité

• H. Ebert

– 1894 : travail de dissociation

*le travail de dissociation qui doit être dépensé de manière à décomposer une molécule électriquement neutre en ses constituants qui sont chargés avec de l'électricité de polarité opposée, doivent être identiques au travail qui doit être dépensé pour retirer les charges de valence de leurs distances au sein des molécules à des distances telles que nous pouvons considérer les molécules dissociées.*

– Arrangement inconnu de l'atome

*Comment ces quantités élémentaires sont **arrangées** dans les atomes, nous l'ignorons. A propos du rayonnement, que nous pouvons rapporter aux vibrations des charges de valence, nous devons conclure qu'elles doivent osciller autour de certaines positions moyennes, au sujet desquelles rien d'exact n'est encore connu, sur la distance entre ces centres d'oscillations dans la molécule.*

– bien que l'association d'un atome positif et d'un atome négatif émerge, cf. MM. W. Giese, A. Schuster, J. J. Thomson, Elster et Geitel

### 3.2 Des Rayons X à l'électron

- Des plaques photographiques placées par hasard par un collègue de Crookes dans un tiroir au-dessous de son appareillage se trouvèrent voilées.
- Crookes répondit à son collègue qu'il avait été imprudent de les avoir placées à cet endroit.
- Wilhelm RÖNTGEN (1845-1923) découvre les rayons X dans la nuit du 8 Novembre 1895.
  - bien que le tube à décharges soit entouré de carton noir épais de manière à exclure toute lumière, une feuille de papier couverte de platinocyanide de baryum placée dans le chemin des rayons devenait fluorescente, même si elle était placée à plus de deux mètres du tubes à décharges.
  - il trouva que des objets de différentes épaisseurs interposés dans le chemin des rayons montraient des transparences variables
  - Il immobilisa la main de sa femme entre les rayons et la plaque photographique : il observa après développement, que la main de sa femme montraient l'ombre des os et d'une bague qu'elle portait. Ce fut le premier « Röntgenogramme » jamais pris.
  - pas de réfraction, ni réflexions des rayons X

Si on se demande ce que sont ces rayons X, puisque ce ne sont pas des rayons cathodiques, on pourrait supposer, de leur pouvoir à exciter la fluorescence et l'activité chimique, qu'ils sont dûs à la lumière ultra-violette. Mais un ensemble pesant de considérations se présente de lui-même en opposition à cette vue. Si les rayons X sont vraiment de la lumière ultra-violette, alors ils devraient posséder les mêmes propriétés que la lumière.

1. Ils ne sont pas réfractés en passant de l'air dans de l'eau, du bisulfide de carbone, de l'aluminium, du sel, du verre ou du zinc.
2. Ils sont incapables de réflexion régulière à la surface des corps précédents.
3. Ils ne peuvent être polarisés par un milieu polarisant ordinaire.
4. L'absorption par des corps variés doit dépendre essentiellement de leur densité.

Ceci pour dire, que ces rayons ultra-violetts doivent se comporter tout de même différemment du visible, de l'infra-rouge et des rayons ultra-violetts connus.

Ces choses apparaissent peu probables, aussi ai-je pensé à une autre hypothèse.

Une certaine relation entre les nouveaux rayons et la lumière semble exister ; au moins la formation des ombres, la fluorescence, et la production d'activité chimique pointent dans cette direction. Maintenant, il est connu depuis longtemps, que bien que les vibrations transverses expliquent les phénomènes de la lumière, il est possible que des vibrations longitudinales puissent exister dans l'éther, et, selon les conceptions de certains physiciens, elles doivent exister. Il est certain que leur existence n'a pas encore été montrée clairement, et leur propriétés ne sont pas expérimentalement démontrées. Ces nouveaux rayons ne seraient-ils pas des manifestations des ondes longitudinales dans l'éther ?

Je dois admettre que, tout au long de ces recherches, je me suis de plus en plus familiarisé avec cette pensée, je m'aventure à avancer cette opinion, alors que je suis tout de même conscient que l'hypothèse avancée nécessite encore de plus solides bases.

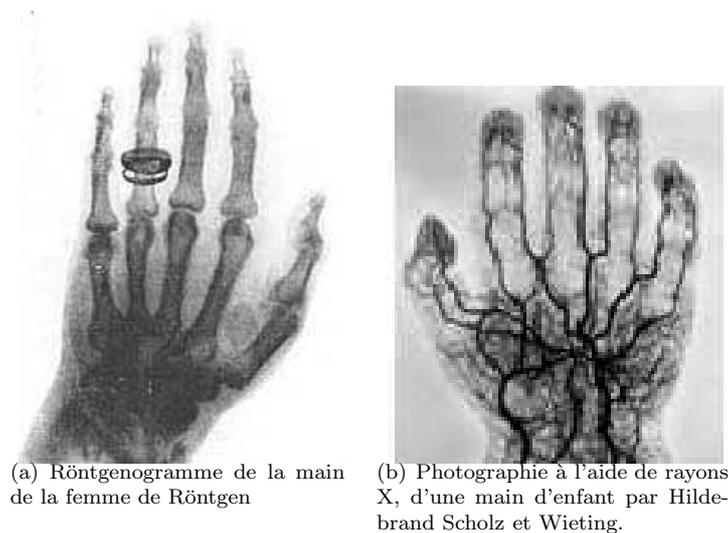


FIG. 12 – Deux radiographies réalisées peu après la découverte des rayons X. La première est de Crookes lui-même et date de 1895. La seconde est due à Hildebrand Scholz et Wieting. Dans les artères de la main morte, ils ont inoculé un fluide contenant du mercure, qui est très opaque aux rayons X (d'après C. Störmer, 1929).

- En 1881, Joseph John Thomson (1856-1940), élève de Maxwell, montra que les rayons cathodiques emportaient de la masse et de l'énergie
  - $\Rightarrow$  rayons cathodiques  $\neq$  rayons électromagnétiques
  - En 1887, Thomson modifia le tube de Crookes en plaçant une paire de plateaux chargés positivement et négativement des deux côtés du faisceau et un aimant avec ses pôles, N et S, perpendiculaires à ces deux plateaux.
  - le faisceau était dévié comme le serait une particule chargée négativement
- Jean-Baptiste Perrin (1870-1942)
  - thèse de 1895 : des particules de charge négative sont associées aux rayons cathodiques
  - Deux interprétations étaient alors possibles
    - ondes lumineuses, manifestations de l'éther (Goldstein, Hertz, Lenard)
    - matière chargée négativement (Crookes, Thomson)
    - Au voisinage de la cathode, le champ électrique est suffisamment intense pour briser en morceaux (en ions) certaines des molécules du gaz résiduel.
    - les ions négatifs se déplacent vers la région où le potentiel est croissant, acquièrent une vitesse considérable et forment les rayons cathodiques

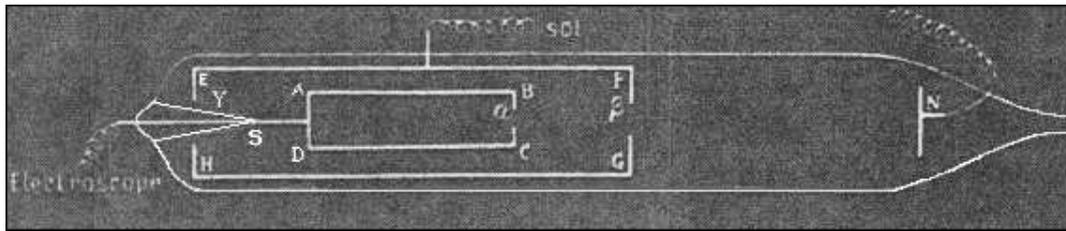


FIG. 13 – Le principe de l'expérience repose sur la loi de l'induction selon laquelle il est possible de détecter des charges électriques à l'intérieur d'un conducteur électrique fermé. Ainsi, les rayons cathodiques sont envoyés à l'intérieur d'un cylindre de Faraday à l'aide d'un tube à vide. ABCD est un tube avec une ouverture  $a$  au centre de la face BC. C'est ce tube qui joue le rôle de cylindre de Faraday. Un fil métallique soudé en 2 connecte ce cylindre avec un électroscope. EFGH est un second cylindre relié à la masse et percé de deux petits orifices  $b$  et  $c$  : il protège le cylindre de Faraday de toute influence extérieure. Enfin, à une distance d'environ 0.10 m, en face de FG, est placée une électrode N. L'électrode N sert de cathode : l'anode est formée par le cylindre protecteur EFGH : ainsi un fin pinceau de rayons cathodiques passent au sein du cylindre de Faraday. Ce cylindre devient invariablement chargé avec de l'électricité négative.

- Leur charge électrique et, par conséquent leur masse (au rapport de 100 000 Coulombs par gramme), est facilement mesurable.
- Les ions positifs se déplacent dans la direction opposée
- Ils forment un faisceau diffus, sensible à l'aimant, et qui n'est pas une radiation au sens propre du terme.
- Thomson
  - En 1895, réalisa une expérience semblable à celle de Perrin
  - En 1897, il détermina le rapport  $\frac{e}{m}$  des particules transportées par les rayons cathodiques
  - Thomson commençait par une revue :
    - Les allemands (à la suite de Hertz) : ondes se propageant au sein d'un éther
    - autre approche : rayons de matière chargée
    - Il considérait que Perrin avait démontré que les rayons cathodiques étaient des particules électrisées, chargées négativement, et ce, parce que ces particules étaient déviées par un champ magnétique
    - une objection devait être levée car l'expérience de Perrin laissait en débat le fait que la cause de l'électrification dans l'électroscope pouvait ne rien avoir à voir avec les rayons cathodiques
    - Argument : Les particules pourraient n'avoir aucun autre rapport avec les rayons cathodiques que celui qu'a une balle de fusil avec l'éclair lorsque la balle est tirée...
    - Réponse : appliquer un champ magnétique qui ne peut recevoir que les particules émises à partir de la cathode
    - En effet, des particules chargées éventuellement induites par le rayonnement électromagnétique ne peut répondre aux caractéristiques requises pour être collectées vers l'électromètre
    - seconde objection par les partisans de la théorie de l'éther
    - aucune déflexion n'a été observée sous de petite force électrostatique et ce, bien que les rayons sont déviés lorsqu'ils passent entre deux électrodes connectés à de large différences de potentiel : dans ce cas, les déviations sont regardées par les partisans de la théorie de l'éther comme résultant des décharges passant entre les électrodes, et non principalement au champ électrostatique
    - Hertz avait produit des rayons entre deux plaques parallèles de métal placées au sein d'un tube à décharges, mais n'observa pas de déviation lorsque les plaques étaient connectées à une batterie
    - en répétant l'expérience, Thomson commença par obtenir le même résultat, mais des expériences supplémentaires montrèrent que l'absence de déviation étaient dues à la conductivité du gaz raréfié résultant des rayons cathodiques
    - Thomson observa que la conductivité diminuait rapidement lorsque le vide était augmenté :

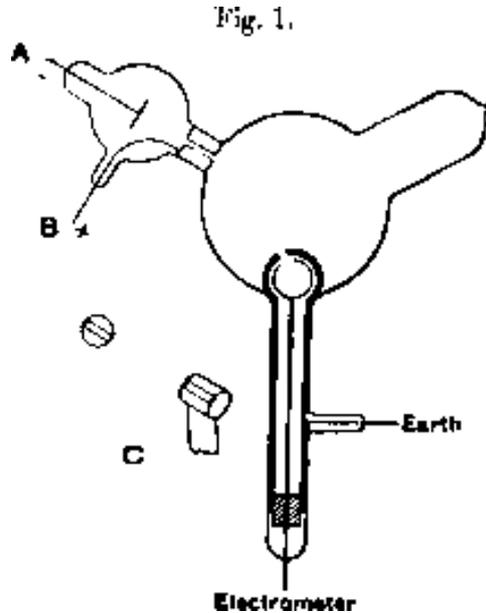


FIG. 14 – Deux cylindres co-axiaux avec de fines fentes sont placés dans un bulbe connecté au tube à décharges ; les rayons cathodiques issus de la cathode A passent au sein du bulbe à travers une fente reliée à la terre. Les rayons cathodiques n’atteignent donc pas les cylindres tant qu’ils ne sont pas déviés par le champ magnétique.

- avec un vide suffisamment poussé, une déviation pouvait être obtenue
- L’objectif est ensuite de déterminer la nature des particules : atomes, molécules ou matière dans un état plus fin de division ?
- réponse : détermination du rapport  $\frac{m}{e}$
- Soit
- $m$  la masse de chaque particule
- $e$  leur charge.
- $N$  le nombre de particules passant à travers une section du faisceau en un temps donné ;
- la quantité  $Q$  d’électricité transportée par ces particules est donnée par l’équation

$$Ne = Q \quad (2)$$

Nous pouvons mesurer  $Q$  si les rayons cathodiques sont collectés par un électromètre. Lorsque ces rayons tombent sur un corps solide, la température du corps est augmentée ; l’énergie cinétique des particules en mouvement est convertie en chaleur. Si l’augmentation de température d’un corps dont la capacité thermique est connue est mesurée, alors l’énergie cinétique  $W$  des particules peut être déterminée. Si  $v$  est la vitesse de ces particules, nous obtenons

$$\frac{1}{2}Nmv^2 = W \quad (3)$$

Si  $\rho$  est le rayon de courbure de ces rayons dans un champ magnétique uniforme  $H$ , l’accélération centrifuge est donnée par  $a_c = \frac{v^2}{\rho}$ . Le principe fondamental de la dynamique s’écrit à l’aide de la force de Lorentz :

$$F = ma_c = evH \Leftrightarrow \frac{mv^2}{\rho} = evH$$

que l’on peut mettre sous la forme

$$\frac{mv}{e} = H\rho = I \quad (4)$$

où  $I$  désigne  $H\rho$  pour être concis. Combinant les équations (2) et (3), nous obtenons

$$\frac{W}{Q} = \frac{1}{2} \frac{mv^2}{e}$$

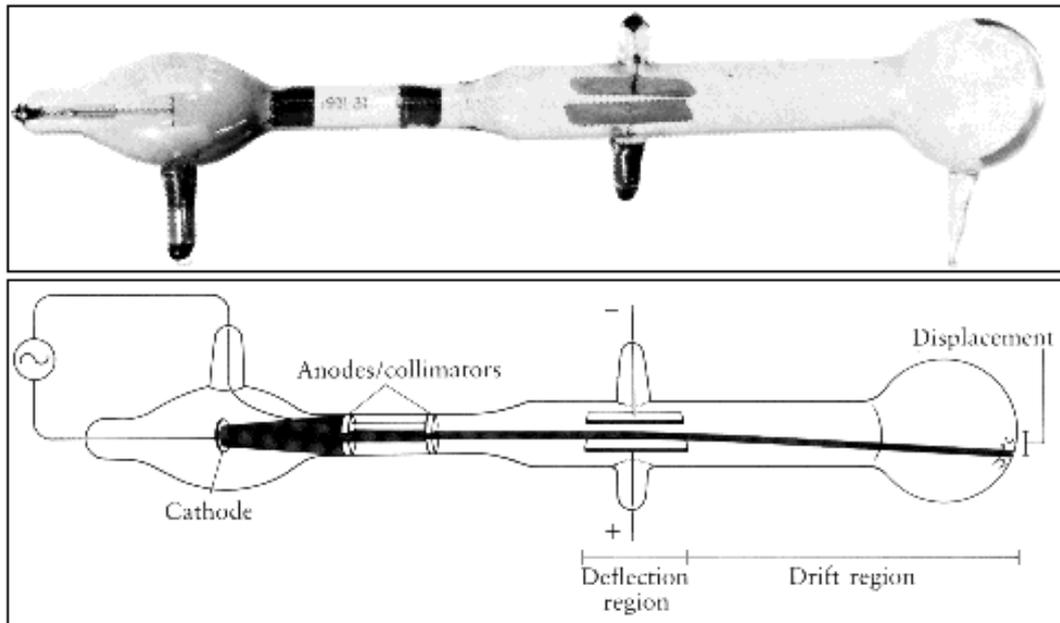


FIG. 15 – Les rayons issus de la cathode C passent à travers une fente au niveau de l’anode A, qui est une borne de métal fixée au sein du tube et reliée à la terre; après avoir passé à travers une seconde fente B, elle-aussi reliée à la terre, ils traversent entre deux plaques parallèles d’aluminium longues d’environ 5 cm par 2 de large et distantes de 1,5 cm. Ils rencontrent alors l’extrémité du tube et produisent un fin spot phosphorescent. Une règle à l’extérieur du tube permet de mesurer la déflexion du spot.

Introduisant l’équation (4), nous obtenons

$$\frac{W}{Q} = \frac{1}{2} I v$$

Puisque

$$v = \frac{2W}{QI}$$

nous obtenons alors

$$\frac{m}{e} = \frac{2W}{Q} \frac{Q^2 I^2}{4W^2}$$

soit

$$\frac{m}{e} = \frac{I^2 Q}{2W}$$

Ainsi, de la mesure de la quantité d’électricité  $Q$ , de l’énergie cinétique  $W$  et du champ magnétique multiplié par le rayon de courbure ( $H\rho = I$ ), Thomson pouvait déduire la valeur de la vitesse et du rapport  $\frac{m}{e}$ .

- La mesure la plus délicate est celle du rayon de courbure  $\rho$  (incertitude  $\approx 20\%$ )
- La mesure de la quantité d’électricité  $Q$  qui entre dans le cylindre intérieur est compliquée par les rayons cathodiques rendant conducteur le gaz à travers lesquels ils passent; ainsi, la charge réelle fournie au cylindre par les rayons cathodiques est supérieure à celle indiquée par l’électromètre.

#### Conclusions de Thomson

- La petitesse du rapport  $\frac{m}{e}$  pourrait être due à la petitesse de  $m$  ou la grandeur de  $e$
- Les porteurs de charges sont petits devant la taille d’une molécule ordinaire (montré par Lenard à l’aide de la diminution de l’intensité de la phosphorescence produite avec la longueur du chemin parcouru par les rayons, c’est-à-dire que le libre parcours moyen correspond à une particule plus petite que celui des molécules ordinaires)

TAB. 4 – Résultats de différentes séries de mesures avec trois types de tubes et différents gaz.

Gaz	Valeur de $\frac{W}{Q}$	$I$	$\frac{m}{e}$	$v$
Tube 1				
Air	$4.6 \times 10^{11}$	230	$.57 \times 10^{-7}$	$4.0 \times 10^9$
Air	$1.8 \times 10^{12}$	350	$.34 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{10}$
Air	$6.1 \times 10^{11}$	230	$.43 \times 10^{-7}$	$5.4 \times 10^9$
Air	$2.5 \times 10^{12}$	400	$.32 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{10}$
Air	$5.5 \times 10^{11}$	230	$.48 \times 10^{-7}$	$4.8 \times 10^9$
Air	$1.0 \times 10^{12}$	285	$.40 \times 10^{-7}$	$7.0 \times 10^9$
Air	$1.0 \times 10^{12}$	285	$.40 \times 10^{-7}$	$7.0 \times 10^9$
Hydrogène	$6.0 \times 10^{12}$	205	$.35 \times 10^{-7}$	$6.0 \times 10^9$
Hydrogène	$2.1 \times 10^{12}$	460	$.50 \times 10^{-7}$	$9.2 \times 10^9$
Acide carbonique	$8.4 \times 10^{11}$	260	$.40 \times 10^{-7}$	$7.5 \times 10^9$
Acide carbonique	$1.47 \times 10^{12}$	340	$.40 \times 10^{-7}$	$8.5 \times 10^9$
Acide carbonique	$3.0 \times 10^{12}$	480	$.39 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{10}$
Tube 2				
Air	$2.8 \times 10^{11}$	175	$.53 \times 10^{-7}$	$3.3 \times 10^9$
Air	$4.4 \times 10^{11}$	195	$.47 \times 10^{-7}$	$4.1 \times 10^9$
Air	$3.5 \times 10^{11}$	181	$.47 \times 10^{-7}$	$3.8 \times 10^9$
Hydrogène	$2.8 \times 10^{11}$	175	$.53 \times 10^{-7}$	$3.3 \times 10^9$
Air	$2.5 \times 10^{11}$	160	$.51 \times 10^{-7}$	$3.1 \times 10^9$
Acide carbonique	$2.0 \times 10^{11}$	148	$.54 \times 10^{-7}$	$2.5 \times 10^9$
Air	$1.8 \times 10^{11}$	151	$.63 \times 10^{-7}$	$2.3 \times 10^9$
Hydrogène	$2.8 \times 10^{11}$	175	$.53 \times 10^{-7}$	$3.3 \times 10^9$
Hydrogène	$4.4 \times 10^{11}$	201	$.46 \times 10^{-7}$	$4.4 \times 10^9$
Air	$2.5 \times 10^{11}$	176	$.61 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^9$
Air	$4.2 \times 10^{11}$	200	$.48 \times 10^{-7}$	$4.1 \times 10^9$
Tube 3				
Air	$2.5 \times 10^{11}$	220	$.90 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^9$
Air	$3.5 \times 10^{11}$	225	$.70 \times 10^{-7}$	$3.2 \times 10^9$
Hydrogène	$3.0 \times 10^{11}$	250	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.5 \times 10^9$

- Les deux points fondamentaux au sujet de ces porteurs me semblent être
  1. Que les porteurs sont les mêmes quel que soit le gaz à travers lequel les décharges passent,
  2. Que le libre parcours moyen ne dépende de rien d'autre que de la densité du milieu traversé par ces rayons
- Hypothèse explicatrice **la plus simple** les atomes de différents éléments chimiques sont des agrégations différentes d'atomes du même type
- Hypothèse formulée par Prout : les atomes « élémentaires » sont des atomes d'hydrogène
- Thomson : Si nous substituons l'hydrogène par des substances primordiales inconnues X, il n'y a rien d'inconsistant avec cette hypothèse
- Au voisinage de la cathode, séparation des molécules en atomes primordiaux : si on les supposait chargés, ils se comporteraient exactement comme les rayons cathodiques
- la matière des rayons cathodiques est dans un nouvel état, un état dans lequel la subdivision de la matière est beaucoup plus loin que dans l'état gazeux ordinaire, un état dans lequel toute matière est du même type : cette matière étant la substance à partir de laquelle tous les éléments chimiques sont faits
  - ⇒ concept de corpuscules élémentaires dont les arrangements différents feraient les différents atomes chimiques
- la petitesse de la valeur de  $\frac{m}{e}$  est, je pense, due autant à la grandeur de  $e$  qu'à la petitesse de  $m$
- charge transportée est grande comparée à celle des ions d'un électrolyte ;
- un atome **chimique** est une agrégation d'un nombre d'atomes primordiaux (faux)
  - ⇒ c'est le **problème de trouver les configurations d'équilibre stable d'un nombre de particules égales agissant sur chaque autre selon quelques lois de force**
- configuration de particules qui se repoussent mutuellement maintenues ensemble par une force centrale
- grand intérêt pour les relations entre les propriétés d'un élément et son poids atomique.
- Malheureusement, les équations qui déterminent la stabilité d'une telle collection de particules augmentent si rapidement en complexité avec le nombre de particules qu'une étude mathématique générale est à peine possible
- Modèle des aimants flottants de Alfred MAYER : les aimants s'arrangent entre eux dans un équilibre sous leurs répulsions mutuelles et une attraction centrale causée par le pôle d'un grand aimant placé sous les aimants flottants
- Relation à la loi périodique

$$\begin{array}{ccccc}
 1. & 2. & 3. & 4. & 5. \\
 \left\{ \begin{array}{l} 1 \cdot 5 \\ 1 \cdot 6 \\ 1 \cdot 7 \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot 6 \\ 2 \cdot 7 \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} 3 \cdot 7 \\ 3 \cdot 8 \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} 4 \cdot 8 \\ 4 \cdot 9 \end{array} \right. & 5 \cdot 9
 \end{array}$$

où, par exemple, 1.6.10.12 signifie un arrangement avec un aimant au milieu, un anneau de six aimants, puis un anneau de 10, et un anneau de 12 à l'extérieur.

*Maintenant supposons qu'une certaine propriété est associée à deux aimants formant un groupe par eux-mêmes ; nous devrions avoir cette propriété avec deux aimants, puis avec 8 et 9, encore avec 19 et 20, et encore avec 34, 35, et ainsi de suite. Ainsi, toute propriété relative à trois aimants formant d'eux-mêmes un système apparaîtrait avec un poids atomique de 3, 10 et 11 : 20, 21, 22, 23 et 24 ; 35, 36, 37 et 39 ; en fait, nous aurons quelque chose tout de même d'analogue à la loi périodique, la première série correspondant à l'arrangement des aimants en un simple groupe, la seconde série à un arrangement en deux groupes, la troisième série en trois groupes, et ainsi de suite.*

- 2 ans plus tard : J. J. Thomson reste avec une détermination du rapport  $\frac{m}{e}$  mais ne peut décider si il est petit en raison

1. d'une faible masse
  2. d'une charge importante
- sa position a évolué par rapport à 1897 puisqu'il commence son article par *bien qu'il y ait des raisons pour penser que la charge  $e$  ne soit pas significativement différente de celle impliquée dans les électrolyses...*
  - Cette méthode ne pouvait être utilisée pour les rayons cathodiques mais elle peut l'être lorsqu'*une électrifcation négative est déchargée par de la lumière ultra-violette*
    - Travaux de Heinrich HERTZ sur les ondes électriques : une surface propre de métal décharge de l'électricité négative lorsque de la lumière ultra-violette tombe dessus
    - A la **pression atmosphérique**, ces ions sont de taille égale aux ions produits à partir de gaz par les rayons de Röntgen ou les rayons de Becquerel
    - A **faible pressions**, il a été montré que les rayons sont semblables aux rayons cathodiques
  - Les résultats de l'expérience :
    - la valeur de  $\frac{m}{e}$  dans le cas de la lumière ultra-violette, et celle pour un filament de carbone dans de l'hydrogène basse pression, sont les mêmes que pour les rayons cathodiques
    - dans le cas de la lumière ultra-violette,  $e$  est du même ordre de grandeur que celui de la charge transportée par l'atome d'hydrogène dans les électrolyses de solutions
    - *dans ce cas, nous avons par conséquent une preuve claire que les ions ont une masse beaucoup plus petite que celles des atomes ordinaires ; ainsi, lors de la convection d'électricité négative à faibles pressions nous avons quelque chose de plus petit que les atomes, dans la mesure où nous les avons pris de la masse de ceux-ci, bien qu'elle soit seulement petite.*
    - la masse de l'atome d'électricité était de l'ordre de 1/1000 de celle de l'atome d'hydrogène
    - *Ainsi avec la lumière ultra-violette, comme avec les rayons cathodiques, l'électrifcation négative à faible pression est trouvée être associée avec des masses qui sont des fractions de masse excessivement plus petites que les plus petites masses jusqu'ici connues — c'est-à-dire celle de l'atome d'hydrogène*
    - Remarque : Jusqu'à ces expériences, il n'avait pas été possible d'interagir avec des particules plus petites que celle de l'atome d'hydrogène en raison de limitations technologiques : principalement, en raison des caractéristiques des pompes à vide et des puissances électriques en jeu
    - Avec une seconde expériences avec un filament de carbone, Thomson parvient à montrer que *le rapport  $\frac{m}{e}$  pour les ions positifs produits par un filament incandescent doit être au moins 1000 fois la valeur pour les ions négatifs, et ceci est une limite inférieure...*
    - Il en conclut :

W. Wien <sup>32</sup> et Ewers <sup>33</sup> ont mesuré les rapports  $\frac{m}{e}$  pour les ions positifs dans un tel tube, et trouvé qu'il est du même ordre que la valeur de  $\frac{m}{e}$  dans les électrolyses ordinaires ; Ewers a montré qu'il dépendait du métal duquel est fait la cathode. Ainsi les porteurs d'électricité positive à faibles pressions semblent être des **molécules ordinaires**, tandis que les porteurs d'électricité négative sont beaucoup plus petits

- charge  $e = 6 \times 10^{-10}$  unités électrostatiques
- $m = 1.4 \times 10^{-3}$  de celle de l'ion d'hydrogène, la plus petite masse jusque là reconnue d'une existence séparée
- La production d'électrifcation négative implique ainsi la division d'un atome, comme si d'une collection d'atomes quelque chose dont la masse est plus petite que celle d'un seul atome était détaché
- Il ajoute : *nous n'avons pas encore de données pour déterminer si la masse de l'atome d'électricité négative est entièrement due à sa charge. Si la charge est  $e$ , la masse apparente due*

---

<sup>32</sup>W. Wien, *Wied. Ann.*, **lxv**, p. 440.

<sup>33</sup>Ewers, *Wied. Ann.*, **LXIX**, p. 187.

à la charge supposée être collectée dans une sphère de rayon  $a$  est  $\frac{e^2}{3\mu a}$  : d'où  $\frac{m}{e}$  dans ce cas est  $\frac{e}{3\mu a}$ . Substituant les valeurs de  $\frac{m}{e}$  et  $e$  trouvée précédemment, nous trouvons que  $a$  devrait être de l'ordre de  $10^{-13}$  centimètre.

- Thomson finit par en conclure que l'ion négatif — également appelé *atome d'électricité négative* — est d'importance fondamentale pour toute théorie d'action électrique :

En effet, il ne semble pas improbable qu'il s'agisse d'une quantité fondamentale en termes de laquelle les processus électriques peuvent être exprimés. Comme nous l'avons vu, **sa masse et sa charge sont invariables**, toutes les deux indépendentes du processus par lequel l'électrification est produite et du gaz duquel les ions sont libérés. Il possède ainsi les caractéristiques d'une **conception fondamentale** de l'électricité ; et il semble souhaitable d'adopter une représentation de l'action électrique qui place cette conception au premier plan. Ces considérations me conduisent à prendre comme hypothèse de travail la méthode suivante de regarder l'électrification d'un gaz, ou celui de matière dans un état.

### 3.3 Les premiers modèles atomiques



William Thomson  
(1821-1894)



Hermann L. Helmholtz  
(1824-1907)



John Joseph Thomson  
(1856-1940)



Jean Perrin  
(1870-1942)

Je regarde l'atome comme contenant un large nombre de petits corps que j'appellerai corpuscules ; ces corpuscules sont égaux à tout autre ; la masse d'un corpuscule est la masse d'un ion négatif dans un gaz à faible pression, c'est-à-dire autour de  $3 \times 10^{-26}$  d'un gramme. Dans un atome normal, cet assemblage de corpuscule forme un système qui est électriquement neutre. Puisque les corpuscules individuels se comportent comme des ions négatifs, tout comme lorsqu'ils sont assemblés dans un atome neutre, les effets négatifs sont compensés par quelque chose qui produit un espace à travers lequel les corpuscules sont éparpillés pour agir comme si il avait une charge d'électricité positive égale en quantité à la somme des charges négatives de ces corpuscules.

Un atome électrisé positivement est un atome qui a perdu certains de sa *masse libre*, et cette masse libre est à être trouvée avec la charge négative correspondante. Les variations de la charge électrique d'un atome sont dues à des corpuscules sortant d'un atome lorsque la charge positive est augmentée, ou à des corpuscules y entrant lorsque la charge négative est augmentée. Ainsi les anions et les cations sont libérées sur les électrodes au cours d'électrolyse des solutions, l'ion avec la charge positive est neutralisée par un corpuscule passant de l'électrode à l'ion, tandis que l'ion avec la charge négative est neutralisé par un corpuscule passant d'un ion à l'électrode. **Les corpuscules sont les véhicules par lequel l'électricité est transportée d'un atome à l'autre.**

- Nous sommes alors conduit à la conclusion que **la masse d'un atome n'est pas invariable** :
- si dans la molécule de HCl, l'atome d'hydrogène a la charge positive et l'atome de chlore la charge négative, alors la masse de l'atome d'hydrogène est plus petite que la moitié de la masse

de la molécule d'hydrogène  $H_2$ , tandis que, au contraire, la masse de l'atome de chlore dans la molécule de  $HCl$  est plus grande que la moitié de la masse de la molécule de chlore  $Cl_2$ .

- La quantité par laquelle la masse d'un atome peut varier est proportionnelle à la charge d'électricité qu'il peut recevoir ;
- la variabilité de la masse d'un atome qui peut être produite par les **processus connus** est proportionnelle à la valence de l'atome, et notre détermination de la masse du corpuscule montre que cette variabilité est seulement une fraction de la masse de l'atome original.
- Thomson en vient alors à considérer le grand nombre de corpuscule pouvant être observé en raison des multiples raies observées dans les spectres
- William Thomson (Lord Kelvin), premières conceptions de l'atome datant de 1897 et améliorées en 1902 :
  - la loi de Faraday de l'équivalence électrochimique semble nécessiter quelque chose d'atomique dans l'électricité et justifier le mot d'*électron* de Johnstone Stoney.
  - introduit le terme d'*électrion* pour l'atome d'électricité positive
  - chaque atome de matière pondérable est un électron qui, avec un électrion neutralisant d'électricité négative, produit une force résultante entre tout électron et électrion distants qui varie en raison inversement proportionnelle au cube des distances,
  - C'est juste ce qui serait si la vertu électrique de l'atome était due à **une distribution uniforme**, à travers l'atome, **d'une substance idéale d'électricité**, de laquelle chaque partie infiniment petite repousse les parties infiniment petites de la substance idéale des autres atomes, et attire des électrons en raison inverse du carré de la distance.
  - **Mais nous ne pouvons faire la supposition correspondante pour les forces mutuelles entre deux atomes se recouvrant ; parce que nous devons rester libres d'ajouter une répulsion ou une attraction selon toute loi de force que nous pouvons trouver convenable à l'explication des propriétés chimiques, élastique et électrique de la matière.**
  - **Il est possible que les différences de qualité des atomes de différentes substances peuvent être partiellement dues aux nombres quantiques différents de leurs électrons**
  - la quantité neutralisante pour un atome peut ne pas être un nombre entier d'électrons.
    - ⇒ a molécule d'un gaz diatomique, l'oxygène, le nitrogène, l'hydrogène ou le chlore, pourrait être avoir trois électrons ou un autre nombre impair d'électrons pour son quantum de telle manière que les simples atomes O, N, H, Cl, s'ils pouvaient exister séparément, devraient être électrisés vitreux ou résineux et non pas neutres
- En 1899, Ernest Rutherford étudie les radiations émanant de l'uranium <sup>34</sup>
  - article communiqué par J. J. Thomson
  - Expérience utilisée :
  - il place des couches successives de feuilles de métal
  - Première expérience avec du métal hollandais : loi d'absorption ordinaire ⇒ radiation homogène
  - Seconde expérience avec de l'aluminium : une simple loi d'absorption ne permet pas d'expliquer les résultats expérimentaux

Ces expériences montrent que la radiation d'uranium est complexe, et qu'il y a en présence au moins deux types distincts de radiations — une qui est très facilement absorbée, qui sera appelée par soucis de simplicité la radiation  $\alpha$ , et l'autre qui est d'un caractère plus pénétrant, qui sera appelée la radiation  $\beta$ .

Le caractère de la radiation  $\beta$  semble être indépendante de la nature du filtre qui lui est appliqué. Il a été trouvé que la radiation de la même intensité et de la même puissance pénétrante était obtenue en coupant les radiations  $\alpha$  par de fines feuilles d'aluminium, ou de papier. La radiation  $\beta$  passe à travers toutes les substances essayées avec une facilité supérieure à celle observées pour la radiation  $\alpha$ . Par exemple, une plaque verre placée sur l'uranium réduit le taux de fuite d'un facteur  $\frac{1}{30}$  de sa valeur ; la radiation  $\beta$ , cependant, passe à travers avec aucune perte d'intensité.

---

<sup>34</sup>E. Rutherford, On uranium radiation and the electrical conduction produced by it, *Philosophical Magazine*, **47**, 109-164, 1899.

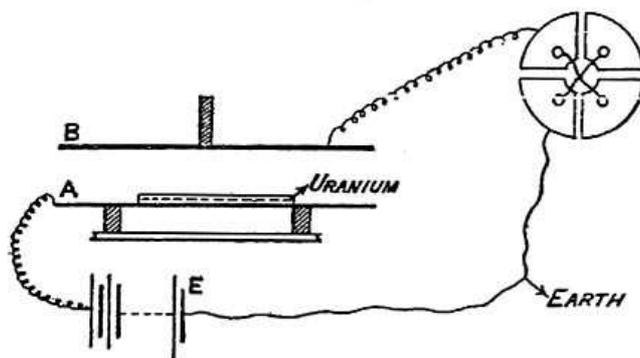


FIG. 16 – L’uranium métallique ou les composés d’uranium employés étaient répandus uniformément sur le centre d’une plaque de zinc horizontale A, de 20 cm de côté. Une plaque de zinc B, de 20 cm de côté, était fixée parallèle à A et à 4 cm de celle-ci. La plaque A était connectée à l’un des pôles de la batterie de 50 volts, l’autre étant reliée à la terre; B était connectée à une paire de quadrants d’un électromètre, l’autre pair étant connectée à la terre.

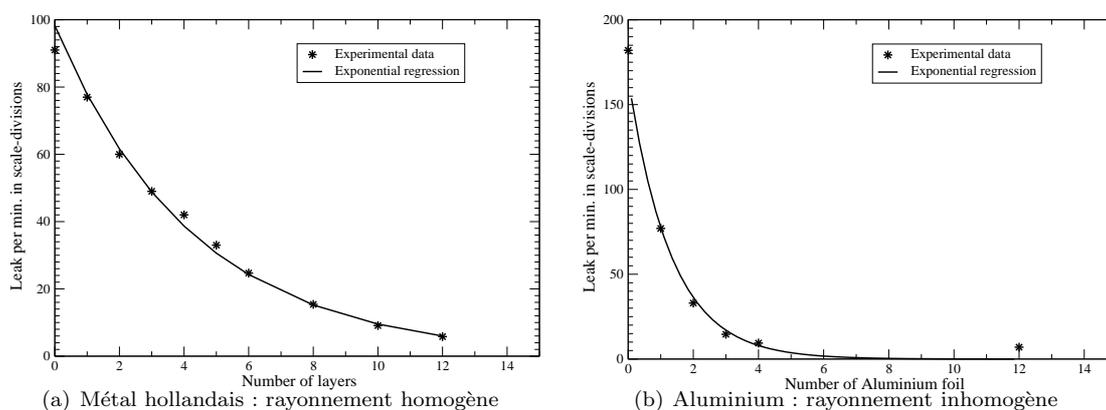


FIG. 17 – Graphique des données de Rutherford avec une régression exponentielle de la forme  $y = 98.197 \cdot e^{-0.23309x}$  pour le rayonnement homogène et de la forme  $y = 165.85 \cdot e^{-0.75894x}$  pour le rayonnement inhomogène. La loi d’absorption habituelle n’est pas respectée dans le cas du rayonnement inhomogène.

- $\Rightarrow$  il y a deux types de radiations :  $\alpha$  et  $\beta$
- Il émet l’hypothèse que les deux radiations sont simples et qu’elles diminuent selon une loi d’absorption ordinaire.
- Soit  $r$  le taux de l’intensité de radiation passant après une distance  $d$  de la substance testée. Avec une loi de la forme  $r = e^{-\lambda d}$ , il estime les coefficients d’absorption pour différentes substances  $\Rightarrow$  variations très importantes selon le type de radiations

L’opacité des métaux — aluminium, cuivre, argent et platine — pour la radiation  $\beta$  suit le même ordre de grandeur que leur poids atomiques.

- Mais l’origine des deux radiations n’est pas encore comprise :

Il est possible que la radiation  $\alpha$  est une radiation secondaire prenant place à la surface de l’uranium par le passage de la radiation  $\beta$  à travers l’uranium, de manière exactement semblable à ce qui se passe lorsqu’une radiation diffuse est produite à la surface d’un métal par le passage des rayons de Röntgen à travers celui-ci. Il n’y a cependant pas, aujourd’hui, d’évidence suffisante pour décider de la question.

L’état des connaissance conduit Perrin à concevoir l’atome comme une entité pas nécessairement élémentaire.

- Jean Perrin fait une analogie avec le système solaire lors d’une conférence faite aux étudiants et aux Amis de l’Université de Paris le 16 Février 1901. Cette conférence — de vulgarisation — comporte un grand nombre d’analogie avec des faits connus. Perrin offre donc une image de ce

que pourrait être l'atome <sup>35</sup> :

Pour la première fois, nous entrevoyons un moyen de pénétrer dans la constitution intime de l'atome. On fera, *par exemple*, l'hypothèse suivante, qui concorde avec les faits précédents.

Chaque atome serait constitué, d'une part, par une ou plusieurs masses très fortement chargées d'électricité positive, sorte de soleils positifs dont la charge serait très supérieure à celle d'un corpuscule, et d'autre part, par une multitude de corpuscules, sorte de petites planètes négatives, l'ensemble de ces masses gravitant sous l'action des forces électriques, et la charge négative totale équivalant exactement à la charge positive totale, en sorte que l'atome soit électriquement neutre.

Les planètes négatives qui appartiennent à deux atomes différents sont identiques ; s'il arrivait que les soleils positifs fussent aussi identiques entre eux, la totalité de l'univers matériel serait formée par le groupement de **deux espèces seulement d'éléments primordiaux**, l'électricité positive et l'électricité négative.

Si une force électrique suffisante agit sur un atome elle pourra détacher une des petites planètes, un corpuscule (formation de rayons cathodiques). Mais il sera deux fois plus difficile d'arracher un deuxième corpuscule en raison de l'excès de la charge positive totale, non altérée, sur la charge négative restante. Il sera trois fois plus difficile d'arracher un troisième corpuscule, et lorsque nos moyens d'action seront épuisés, nous n'aurons encore presque rien arraché de l'atome dont l'insécabilité apparente se trouve ainsi expliquée. **Quant à arracher un soleil positif, ce serait tout à fait hors de notre puissance actuelle.**

- Perrin compare les durées de révolutions des différentes masses intérieures aux longueurs d'onde des lumières que manifestent les raies du spectre d'émission.
- Exemple de l'atome d'aluminium :
  1. Admettons que les corpuscules qui forment ces rayons avaient à peu près la même vitesse dans les atomes d'où la lumière les a détachés, soit 1000 kilomètres par seconde
  2. cherchons le temps que devait mettre un de ces corpuscules pour décrire avec cette vitesse la circonférence de l'atome d'aluminium, soit  $10^{-7}$  centimètres
  3.  $\Rightarrow$  nous trouvons que la durée de cette gravitation (l'année de cette planète) est d'environ  $10^{-15}$  secondes
  4. or les périodes de vibrations des raies de l'aluminium sont comprises entre  $10^{-15}$  et  $\frac{1}{2}10^{-15}$  secondes.
- **Il y a là une coïncidence remarquable, à ma connaissance non encore signalée**
- Première explication de la radioactivité :

Si l'atome est très lourd, c'est-à-dire probablement très grand, le corpuscule très éloigné du centre — **le Neptune du système** —, sera mal retenu dans sa course par l'attraction électrique du reste de l'atome ; la moindre cause l'en détachera ; la formation de rayons cathodiques pourra devenir tellement facile que la matière paraisse spontanément *radioactive* ; tels sont l'uranium, le thorium, qui précisément ont les plus grands poids atomiques sûrement connus ;

En 1902, Rutherford fit une revue sur l'existence de corps plus petits que l'atome <sup>36</sup>

- mention des expériences de Thomson sur la vitesse des rayons cathodiques mais également celles portant sur la vitesse des électrons émis à partir de substances radioactives qui ont une vitesse bien supérieure à celle des rayons cathodiques dans un tube à vide.

---

<sup>35</sup>Comme Perrin l'affirme lui-même dans son livre *Les atomes* : « Je crois avoir le premier indiqué ce modèle ». La description est publiée dans Perrin, *Les hypothèses moléculaires*, *Revue scientifique*, **15**, 449-461, 1901.

<sup>36</sup>E. Rutherford, *The existence of bodies smaller than atoms*, *Royal Society of Canada*, **8**, 79-86, 1902.

- La plus grande vitesse observée pour des rayons cathodiques est de l'ordre d'un tiers de la vitesse de la lumière
- Walter Kaufmann (1871-1947) :
  - la vitesse de certains électrons du radium ont environ 95 pour cent de la vitesse de la lumière
  - la masse apparente de l'électron augmentait avec la vitesse
  - diamètre apparent de l'électron  $\approx 10^{-13}$  cms
- Rutherford commenta alors :

Les expériences de ces porteurs à très haute vitesse sont actuellement d'une grande importance, de manière à mettre un peu de lumière sur la question de savoir si la masse de l'électron est apparente ou réelle. Sur la théorie actuelle de l'électromagnétisme **un corps chargé se déplaçant rapidement augmente sa masse avec la vitesse**. Quand les porteurs voyagent avec la vitesse de la lumière, leur masse apparente doit être infinie.

Il n'est pas encore établi quelle proportion de la masse apparente est électrique. Il pourrait être possible de montrer que la masse est entièrement d'origine électrique. Si cela devait être le cas, et cela ne semble pas être improbable, cela constituerait une forte évidence pour soutenir le point de vue que **toute masse est de nature électrique**.

- Propriétés de l'électron sont fondamentales  $\Rightarrow$  électron = plus petit constituant de la matière

A partir de ces considérations, un atome d'hydrogène, par exemple est une structure très compliquée probablement faites d'un millier ou plus d'électrons. Les éléments variés diffèrent les uns des autres par le nombre et l'arrangement des électrons qui composent l'atome.

Nous avons alors un type d'hypothèse de Prout modifiée selon laquelle l'électron est le corpuscule ultime dont toute matière est composée.

- Le fait qu'un atome soit un agrégat compliqué au lieu d'une simple entité n'invalide en aucun cas les bases de la chimie théorique
- Tout ce que nous avons à supposer est qu'un atome chimique soit la plus petite quantité de matière qui prend part dans des combinaisons chimiques, et que la perte d'un électron est un changement sub-atomique plutôt distinct des actions chimiques ordinaires, bien qu'une action chimique puisse dans certains cas être accompagnée par l'émission d'électrons.
- Découverte redevable à de nombreux scientifiques :

L'existence physique des électrons est maintenant acceptée par plusieurs scientifiques et il y a un large nombre de physiciens de premier plan qui ont développé mathématiquement la séquence logique des idées. Il me suffit de mentionner quelques uns des plus importants protagonistes :

- Paul Carl Ludwig Drude (1863-1906) (théorie électronique des métaux), Wolde-mar Voigt (1850-1919) (effet Doppler pour la lumière) et Eduard Riecke (1845-1915) (lien entre chaleur et électricité) en Allemagne ;
- Hendrik Lorentz (1853-1928) (théorie de l'électron) et Pieter Zeeman (1865-1943) (effet Zeeman) en Hollande ;
- Henri Poincaré (1854-1912) (théorie de l'électron) et Henri Becquerel (1852-1908) (radioactivité de l'uranium) en France ;
- John J. Thomson (1856-1940), Arthur Schuster (1851-1934), Olivier Joseph Lodge (1851-1940) and Lord Kelvin (William Thomson — 1824-1907) en Angleterre pour montrer que le point de vue a une base solide de soutien parmi les physiciens les plus capables.

Deux ans plus tard, en 1904, J. J. Thomson proposa une première structure de l'atome <sup>37</sup> :

---

<sup>37</sup>J.J. Thomson, On the structure of the atom : an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure, *Philosophical Magazine* (Series 6), **7** (39), 237-265, 1904.

La vision selon laquelle les atomes des éléments consistent en un nombre de corpuscules négativement électrisés enfermés dans une sphère d'électrification positive uniforme, suggère, parmi d'autres problèmes mathématiques intéressants, celui discuté dans cet article, soit celui du mouvement d'un anneau de  $n$  particules négativement électrisées placées à l'intérieur d'une sphère uniformément électrisée. Supposons que lorsque  $n$  particules électrisées sont arrangées à intervalles angulaires égaux sur la circonférence d'un cercle de rayon  $a$ , chaque corpuscule transporte une charge  $e$  d'électricité négative. Soit  $ne$  la charge d'électricité positive, alors si  $b$  est le rayon de cette sphère, l'attraction radiale sur un corpuscule due à l'électrification positive est égale à  $\frac{\nu e^2 a}{b^3}$ ; si les corpuscules sont au repos, cette attraction doit être compensée par la répulsion exercée par les autres corpuscules.

- après de laborieux calculs (15 pages)
- Nécessité d'ajouter des corpuscules au centre pour maintenir les arrangements trop importants
- Il obtient le plus petit nombre  $p$  de corpuscules à placer au centre en fonction du nombre de  $n$  corpuscules placés sur l'anneau :

au centre $n$	...	5	6	7	8	9	10	15	20	30	40
sur l'anneau $p$	...	0	1	1	2	3	15	39	101	232	

Il obtient alors l'arrangement suivant :

Les corpuscules forment une série d'anneaux, les corpuscules sur un anneau étant approximativement dans des plans à angle droit des axes de rotation, le nombre de particules dans les anneaux diminuant lorsque le rayon de l'anneau diminue. Si les corpuscules peuvent se mouvoir à angle droit du plan de leur orbite, les anneaux seront dans des plans différents s'ajustant eux-mêmes de manière à ce que la répulsion entre les anneaux soit compensée par l'attraction exercée par la sphère d'électrification positive dans laquelle ils sont placés. [...] Chaque corpuscule se déplaçant à grande vitesse sur la circonférence de l'anneau sur lequel il est situé :

- les anneaux sont arrangés de manière à ce que ceux contenant un grand nombre de corpuscule soient proches de la surface de la sphère, tandis que ceux sur lesquels il y a un petit nombre de corpuscule soient plus à l'intérieur.
- La rotation est requise afin de rendre stable l'arrangement
- Le besoin d'avoir plusieurs anneaux concentriques résulte du fait que seuls les anneaux avec un petit nombre de corpuscules sont stables sans en placer un au centre.
- seuls les anneaux de petites tailles peuvent se placer proche du centre
- Les autres, plus grands et pourvus d'une population de corpuscules plus importante, doivent entourer des anneaux plus petits pour être stables.
- Thomson parvient donc à une structure en anneaux concentriques.
- Thomson a également pensé à une structure en coquille mais les difficultés géométriques et analytiques sont beaucoup plus grandes  $\Rightarrow$  pas de solution pour cela en 1904...

je me limiterai moi-même à ce cas, et à l'effort de montrer que les propriétés conférées aux atomes par cette structure sont analogues sous plusieurs aspects à celles que possèdent les atomes des éléments chimiques et que, en particulier, ces propriétés de l'atome dépendent de son poids atomique, d'une manière très analogue à celle exprimée par la loi périodique.

- Les arrangement peuvent être classés en familles, les groupements de corpuscules dans les différents membres d'une famille ayant certains comportements en commun.
- Exemple : Comparaison entre 60 et 40
- Mais ces familles ne correspondent pas exactement aux colonnes du tableau de Mendeleïev...
- Selon le modèle de Thomson, les propriétés des atomes résultent plus de la structure des anneaux internes qu'externes (ce qui se révélera contraire à la théorie actuelle) (Tab. 6)

TAB. 5 – La table suivante, qui donne la manière selon laquelle différents nombres de groupes de corpuscules s’arrangent d’eux-mêmes.

Nombre de corpuscules	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Nombre dans les anneaux successifs	20	19	18	17	16	16	15	13	12	10	8	5
	16	16	15	14	13	12	10	9	7	5	2	
	13	12	11	10	8	6	5	3	1			
	8	7	5	4	3	1						
	3	1	1									

TAB. 6 – Série entière de l’arrangement de corpuscules pour lesquels l’anneau extérieur est constitué de 20 corpuscules. 59 est le plus petit nombre de corpuscules pour lequel nous pouvons avoir un anneau extérieur de 20 corpuscules, tandis que lorsque le nombre de corpuscules est supérieur à 67, l’anneau extérieur contiendra plus de 20 corpuscules.

Nombre de corpuscules	59	60	61	62	63	64	65	66	67
Nombre dans les anneaux successifs	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	16	16	16	17	17	17	17	17	17
	13	13	13	13	13	13	14	14	15
	8	8	9	9	10	10	10	10	10
	2	3	3	3	3	4	4	5	5

- Pour expliquer les changements graduels des propriétés des éléments qui prennent place lorsque nous suivons l’une des lignes horizontales dans l’arrangement de Mendeleïev
- Avec  $n = 59$ , l’anneau externe est à la limite de la stabilité  $\Rightarrow$  ajouter des corpuscules augmente la stabilité
- quand  $n$  augmente, l’atome devient moins électro-positif (capacité plus faible à être un ion positif..)
- à gauche, proche de la limite inférieure de stabilité, l’atome sera plus stable si on lui ajoute des corpuscules  $\Rightarrow$  il est donc électro-négatif
- à droite, il est proche d’un réarrangement de la couche externe  $\Rightarrow$  ce qui est implicite, c’est la prépondérance à préserver la couche externe ! Hypothèse non discutée par Thomson...
- Analogie avec la série des éléments :
 

He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
- Thomson explique également les combinaisons entre atomes différents par transfert de charge de l’un à l’autre

Si nous avons un atome A tel que la perte de énergie potentielle due à la chute d’un corpuscule de l’extérieur est plus grande que le travail requis pour extraire un corpuscule d’un atome B d’un type différent, alors un mélange intermédiaire d’atomes de A et de B en résultera, les atomes de A attirant les corpuscules des atomes de B. Ainsi, les atomes A deviendront négatifs et les atomes B électrisés positivement, et les atomes d’électricités opposées se combineront pour former le composé tel que  $A_-B_+$ ...

### 3.4 Modèle saturnien de Nagaoka

- A la suite d’une étude de Maxwell sur les anneaux de Saturne
- 1904 : Hantaro NAGAOKA (1865-1950), de l’Université Impériale de Tokyo, proposa un modèle atomique construit par analogie sur la structure des anneaux de Saturne <sup>38</sup>

<sup>38</sup>H. Nagaoka, Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity, *Philo-*

- Objectifs : Décrire l'origine des lignes spectrales et le phénomène de la radioactivité
- passe par l'aspect cinétique d'un système matériel dont les vibrations correspondent aux lignes spectrales
- Références à la formule de Johann Jakob BALMER (1825-1898)<sup>39</sup> s'intéressa d'un point de vue mathématique à la structure des spectres lumineux émis par les décharges gazeuses.
- En 1885, formule visible pour le spectre visible de l'hydrogène :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $R$  est une constante — maintenant appelée constante de Rydberg — et  $n$  un nombre entier.

- établie sur la base de quatre raies alors identifiées à cette époque et correspondant à  $n = 3 ; 4 ; 5$  et 6
- référence également à KAYSER, RUNGE et Johannes Robert RYDBERG (1854-1919)
- formule qui donne toutes les longueurs d'ondes  $\lambda$  en fonction de deux nombres entiers  $n$  et  $m$ , du numéro atomique  $Z$  et d'une constante  $R$ <sup>40</sup>



Johann Jakob Balmer  
(1825-1898)



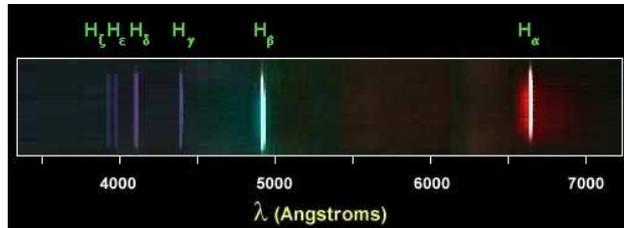
Carl David Tolmé Runge  
(1856-1927)



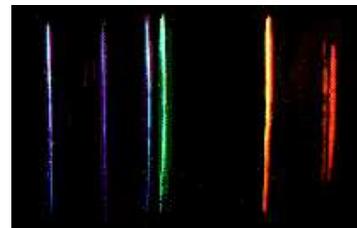
Heinrich Kayser  
(1853-1940)



Jannes Robert Rydberg  
(1854-1919)



(a) Raies de l'Hydrogène



(b) Raies de l'Hélium

FIG. 18 – Raies spectrales de l'hydrogène, dites raies de Balmer, en raison de la description donnée par Balmer en 1885. Carl Runge (1885) et Heinrich Kayser (1895) travaillèrent — ensemble sur une certaine période — sur le spectre de l'Hélium.

Plutôt que chercher à trouver un système dont les modes de vibration sont en complète harmonie avec les lignes spectrales habituellement observées, dans la mesure où les formules empiriques sont encore sujettes aux discussions, le système, que je vais discuter, consiste en un grand nombre de particules de masses égales arrangées sur un cercle à intervalles angulaires égaux et se repoussant entre elles avec une force inversement proportionnelle au carré de la distance ; au centre du cercle, est placée **une** particule de grande masse attirant les autres particules selon la même loi de force. Si les particules se repoussant orbitent avec à peu près la même vitesse autour du centre attractif, le système restera généralement stable, pour des petites perturbations,

*sophical Magazine*, Series 6, **7**, 445-455, 1904.

<sup>39</sup>J. J. Balmer, Notiz über die Spektrallinien des Wasserstoffs, *Annalen der Physik und Chemie*, **25**, 80, 1885.

<sup>40</sup>J. R. Rydberg, Recherches sur la constitution des spectres d'émission des éléments chimiques, *Svenska Vetensk. Aka. Handl.* :

$$\frac{1}{\lambda} = Z^2 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) R$$

. **23** (11), 1889 — La distribution des raies spectrales, Rapport présenté au *Congrès de Physique*, **2**, 200, 1900.

du moment que la force attractante est suffisamment grande. **Le système diffère du système Saturnien considéré par Maxwell en ce que les particules se repoussent au lieu de s'attirer.**

- Les études sur les rayons cathodiques et la radioactivité ont montré qu'un tel système est concevable comme un atome idéal
- Se réfère à une conférence de Oliver Lodge qui aurait attiré l'attention sur un modèle Saturnien qui sera probablement du même type que celui discuté ici
- **Les objections à un tel système d'électrons est que le système doit rester finalement au repos, en raison de la perte d'énergie par radiations, si la perte n'est pas proprement compensée**
- Autant d'anneaux de particules que de lignes spectrales, pas nécessairement dans le même plan
- L'apparence de doublets dans les éléments du groupe des alcalins pourraient être attribués à la séparation par une force magnétique d'un autre anneau, mais il est extrêmement improbable que ce champ soit suffisamment grand pour produire la séparation observée
- les perturbations mutuelles entre anneaux impliqueront une structure inextricable dans la structure du spectre
- Nagaoka retrouve une formule empirique de Deslandres dans une forme légèrement altérée ainsi qu'une formule utilisée par Kayser et Runge pour le spectre du "cyanogène" (1889)
- En construisant des lignes de fréquences, nous trouvons une ressemblance proche avec les spectres comme le montre les figures...

FIG. 19 – Reconstruction des spectres à l'aide des calculs de Nagaoka

- La fréquence augmente avec un entier  $h$ , et la nature de la série montre que les lignes spectrales correspondant à ces vibrations vont graduellement se multiplier lorsque  $h$  est grand
- Une différence importante entre les résultats présents et les formules empiriques ne doit pas être oublié. Lorsque  $h$  est très grand, la différence entre deux lignes successives commence à diverger, mais dans la formule empirique donnée par différents personnes du domaine de recherche, la fréquence tend finalement vers une valeur limite. Il semble douteux que de très grandes valeurs de  $h$  puissent être observées...
- Dans le cas présent, les particules doivent être **très petites comparées au centre attractif**, de manière à ce que les anneaux ne collapsent pas, lorsque des perturbations correspondant à des grandes valeurs de  $h$  se propagent le long des anneaux.
- Nous avons supposé que  $\nu$  particules sont arrangées sur un cercle, mais dans le cas réel, les particules pourraient être à des distances légèrement différentes du point attractant, qui a été identifié comme un point géométrique
- l'hypothèse d'un point central ne sera qu'une approximation grossière, et nous avons raison de croire que la complexité de la structure des lignes spectrales en est une conséquence
- Plus les anneaux sont massifs plus les lignes correspondantes sont simples  $\Rightarrow$  les grands poids atomiques seront accompagnés par des lignes spectrales simples (comme celle du radium sont plus simples que celles du fer ou du mercure).
- Deux anneaux voisins s'influenceront tant qu'ils produiront des ondes forcées, qui entraîneront des oscillations
- Il pourrait se produire des cas où la résonance en raison des oscillations d'autres atomes pourrait rendre l'amplitude extrêmement grande et finalement déchirer les anneaux.
- L'un des faits les plus notables est l'influence de l'amplitude des oscillations d'un anneau sur l'autre
- il affecte la période d'un anneau voisin sur une faible distance et pourrait causer les fluctuations des lignes spectrales
- Le mouvement des anneaux ne sera pas oscillant, mais au cours du temps, si les perturbations

- persistent, elles prendront une telle amplitude que les anneaux se briseront
- dans ce cas, les particules voleront avec des vitesses énormes et la particule centrale participera au mouvement d'ensemble, selon la loi de la conservation du centre de masse
  - Si les particules sont supposées être des électrons négatifs, ils se disperseront dans des directions variées avec de grandes vitesses, et des particules chargées positivement au centre voleront également...
  - Ici nous arrivons à une **analogie mécanique** qui explique la production des rayons  $\alpha$  et  $\beta$  par la désintégration d'un atome idéal
  - les résultats de ces calculs conduisent à la conclusion que le phénomène de la radioactivité est remarquablement mis en évidence dans les éléments avec un grand poids atomique.
  - Si le spectre des éléments est dû au mouvement des électrons circulant sur des orbites circulaires, comme nous l'avons supposé, plusieurs anneaux d'électrons doivent exister lorsqu'il y a plusieurs séries spectrales, comme c'est le cas de la plupart des éléments
  - La destruction du système sera plus aisée par de la lumière ultra-violette  $\Rightarrow$  explication de l'effet photo-électrique !
  - La théorie du cohéreur est probablement à baser sur le fait qu'un courant électrique consiste en un faisceau d'électrons rendus libres par une onde électromagnétique incidente...
    - cohéreur de Edouard Branly (1844-1940)
    - constate que la résistance d'une poudre métallique enfermée dans un tube de verre est fortement abaissée sous l'influence du rayonnement électromagnétique d'une étincelle électrique et qu'un faible choc ramène cette résistance à sa valeur initiale
    - Radioconducteur à limaille
    - Sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique le dispositif devient conducteur et laisse passer le courant dans le circuit.
    - Lodge eût aussi l'idée d'utiliser ce dispositif à l'étude des ondes hertziennes.
    - Les anglo-saxons disent que la limaille a été « cohérée ».
    - Il faut pour la « décohéner » donner un petit choc sur le tube.
  - De ce fait le tube portera le nom de « COHERER » qui sera francisé en « COHÉREUR » malgré les protestations de Branly qui tenait au terme de radioconducteur.
  - Les calculs grossiers et l'exposition plutôt rapide des phénomènes variés pourraient servir comme une allusion à une solution plus complète de la structure atomique.

### 3.5 Nombre de corpuscule dans un atome

En 1906, John Thomson étudie le nombre de corpuscules que peut contenir un atome <sup>41</sup> :

Je considère dans cet article trois méthodes pour la détermination du nombre de corpuscules dans un atome d'une substance élémentaire, toutes me conduisant à la conclusion que ce nombre est du même ordre que le poids atomique de la substance. Deux de ces méthodes montrent de plus que le rapport du nombre de corpuscules dans l'atome au poids atomique de l'élément est le même pour tous les éléments. Les données maintenant disponibles indiquent que le nombre de corpuscules dans l'atome est égal au poids atomique. Comme, toutefois, l'évidence est plutôt indirecte et que les données ne sont pas très nombreuses, de plus amples études sont nécessaire avant que nous soyons assurés de cette égalité ; l'évidence maintenant disponible semble, cependant, suffisante pour établir la conclusion que le nombre de corpuscules n'est pas significativement différent du poids atomique.

- Une certaine redondance car le résultat est d'importance et les évidences pas très nettes mais

Il sera vu que les méthodes sont très différentes et impliquent des phénomènes physiques très différents ; et bien qu'aucune de ces méthodes ne puisse, je pense, être regardée comme tout de même suffisante en elle-même, l'évidence devient très forte

<sup>41</sup>J. J. Thomson, On the number of corpuscules in an atom, *Philosophical Magazine*, **11**, 769-781, 1906.

lorsque nous trouvons que de telles méthodes si différentes contruisent pratiquement aux mêmes résultats.

- Les méthodes impliquées impliquent respectivement :
  1. la dispersion de la lumière par les gaz. Thomson calcule alors des indices de réfraction l'hélium qu'il compare avec les mesures de KETTELER et les résultats de Lord RAYLEIGH
  2. la diffusion des rayons de Röntgen par des gaz. Thomson s'appuie sur l'un de ses résultats obtenu sur la *conduction de l'électricité à travers les gaz* qui montrent que lorsque les rayons de Röntgen passent à travers un milieu dans lequel il y a  $N$  corpuscules par centimètre cube, l'énergie de radiation diffusée par centimètre cube du milieu est

$$\frac{8\pi Ne^4}{3 m^2} E$$

où  $E$  est l'énergie de la radiation primaire passant à travers le centimètre cube,  $e$  la charge, et  $m$  la masse du corpuscule. BARKLA a montré que le rapport de l'énergie diffusée sur l'énergie primaire ne dépendait pas du gaz et que le nombre de corpuscules par centimètre cube est proportionnel à la masse de l'atome, c'est-à-dire au poids atomique. Barkla a trouvé qu'il y avait 25 corpuscules dans chaque molécule d'air — ce qui est proche de 28, le nombre de corpuscules dans chaque molécule si le nombre dans l'atome était égal au poids atomique — et ceci indique que le nombre de corpuscules dans un atome est égal au poids atomique.

3. l'absorption de rayons  $\beta$ . Cette absorption est due aux effets des collisions entre les rayons  $\beta$  et les corpuscules qu'ils rencontrent au cours de leur chemin à travers la substance absorbante. Thomson utilise alors la détermination du coefficient d'absorption.
- Dans ces considérations, Thomson considère toujours l'atome comme *constitué d'un nombre de corpuscules dispersés à travers une sphère d'électrification positive uniforme*
  - Mais tout n'est pas si simple car :

Un argument évident contre le nombre de corpuscules dans l'atome étant aussi petit que l'indiquent ces résultats indirects, est que le nombre de lignes montrant l'effet Zeeman, qui doivent par conséquent être dues aux vibrations des corpuscules, dans le spectre, disons du fer, est beaucoup plus grand que le poids atomique du fer. Cette objection serait définitive s'il pouvait être montré que toutes ces lignes sont dues aux vibrations des corpuscules à l'intérieur de l'atome normal de fer ; mais je pense qu'il n'y a aucune évidence que cela est le cas.

### 3.6 Retour sur la charge des particules $\alpha$

Rutherford avec l'aide de l'un de ses étudiants, Hans GEIGER, reprend ses mesures sur la charge des particules  $\alpha$ .

- Les valeurs de  $e$  alors obtenues étaient :
  - par J. J. Thomson,  $3.4 \times 10^{-10}$  unité ;
  - par H. A. Wilson  $3.1 \times 10^{-10}$  unité ;
  - par R. A. Millikan  $4.06 \times 10^{-10}$  unité.

La valeur de la charge pour les particules  $\alpha$  trouvée par Rutherford et Geiger est de  $9.3 \times 10^{-10}$  unité, soit entre  $2e$  et  $3e$ .

- A partir des données radio-actives qui indiquent que les particules  $\alpha$  transportent une charge  $2e$ , ils concluent que les valeurs ordinairement acceptées de  $e$  sont quelque peu trop petites
- Ils mentionnent également qu'un travail de Regener qui conduit au résultat qu'une particule  $\alpha$  transportait une charge  $2e$ . Le nombre de scintillations d'une préparation de polonium étaient comptées et supposées être égales au nombre de particules  $\alpha$  émises.

- Rutherford et Geiger ont trouvé que les particules  $\alpha$  transportaient une charge de  $9.3 \times 10^{-10}$  unité; après avoir montré qu'elle devait correspondre à deux fois la charge de l'atome d'hydrogène, ils en concluent que la valeur de la charge de ce dernier devait être  $4.65 \times 10^{-10}$ .
- il y a également une raison pour la sous-estimation dans la valeur de la charge des particules  $\alpha$  à partir de la période caractéristique de la radioactivité du radium. Ils finissent par conclure :

Considérant l'ensemble des données, nous pouvons conclure avec une certaine certitude que les particules  $\alpha$  transportent une charge  $2e$ , et que la valeur de  $e$  n'est pas très différente de  $4.65 \times 10^{-10}$  unité E.S.

- une note de bas de page précise : Il est intéressant de noter que Planck déduisit une valeur de  $e = 4.69 \times 10^{-10}$  unité E.S. d'une théorie optique général de la température de rayonnement naturel.
- Rutherford et Geiger récapitulent alors les données connues en 1908 :

Charge transportée par un atome d'hydrogène	$4.65 \times 10^{-10}$ unité E.S.
Charge transportée par une particule $\alpha$	$9.3 \times 10^{-10}$ unité E.S.
Nombre d'atomes d'un gramme de hydrogène	$6.2 \times 10^{23}$
Masse de l'atome d'hydrogène	$1.61 \times 10^{-24}$ gramme
Nombre de molécules par centimètre cube de tout gaz dans les conditions standards de pression et de température	$2.72 \times 10^{19}$

- Valeur de la charge élémentaire  $e$  datant de 1969 qui est de  $(4.803250 \pm 0.000021) \times 10^{-10}$  unité E.S.
- à partir du rapport  $\frac{e}{m} = 9.63 \times 10^3$  pour l'atome d'hydrogène
- du rapport  $\frac{E}{M} = 5.07 \times 10^3$  pour les particules  $\alpha$
- et sachant que  $E = 2e \Rightarrow M = 3.84m$ , c'est-à-dire que le poids atomique des particules  $\alpha$  est de 3.84.
- Le poids atomique de l'Hélium étant de 3.96, ils concluent que

*une particule  $\alpha$  est un atome d'hélium, ou, pour être plus précis, les particules  $\alpha$ , une fois qu'elle a perdu sa charge positive, est un atome d'hélium.*

- Notons que la durée de vie du radium est réduite avec ces nouvelles données à 1760 ans — par rapport aux 1850 années trouvés en 1904.

### 3.7 Diffusion et réflexion de particules $\alpha$

En 1910, Rutherford chargea Geiger de mesurer le nombre de particules  $\alpha$  en fonction de l'angle de diffusion <sup>42</sup>. Avec un jeune étudiant, Ernest Marsden (1889-1970), Geiger étudie la réflexion des particules  $\alpha$  :

Lorsque les particules  $\beta$  tombent sur un plaque, une radiation dure émerge du même côté de la plaque que celui sur lequel les particules  $\beta$  tombent. Cette radiation est regardée par plusieurs observateurs comme une radiation secondaire, mais des expériences plus récentes semblent montrer qu'elle consiste principalement en particules  $\beta$ , qui ont été diffusées à l'intérieur du matériau d'une telle manière qu'elles émergent encore du même côté de la plaque <sup>43</sup>. Pour des particules  $\alpha$ , un effet similaire n'avait pas encore été observé, et n'est peut-être pas attendu sur le fait qu'un relativement petit nombre de diffusions que les particules  $\alpha$  subissent en pénétrant la matière <sup>44</sup>

<sup>42</sup>H. Geiger & E. Marsden, On a diffuse reflection of the  $\alpha$ -particles, *Proceedings of the Royal Society of London*, **82**, 495-500, 1909.

<sup>43</sup>Schmidt, *Jarhbuch der Radioaktivität und Elektronik*, **5**, p. 471, 1908.

<sup>44</sup>E. Rutherford, *Philosophical Magazine*, **12**, p. 143, 1906 — H. Geiger, *Proceedings of the Royal Society A*, **81**, p. 174, 1908.

Dans les expériences suivantes, cependant, des conclusions évidentes ont été trouvées sur l'existence d'une réflexion diffuse de particules  $\alpha$ . Une petite fraction des particules  $\alpha$  tombant sur une plaque de métal ont leur direction modifiée de telle manière qu'elles émergent encore du côté de l'incidence.

- utilisation de la méthode des scintillations — appelée maintenant compteur Geiger — détaillée par Regener <sup>45</sup> et, Rutherford & Geiger <sup>46</sup>.
- L'expérience est représentée Fig. 20.

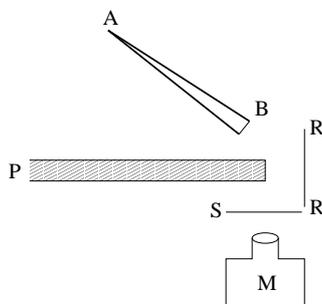


FIG. 20 – La source consiste en un tube de verre AB, de forme conique et rempli d'une émanation de radium, l'extrémité B du tube étant scellée par une fenêtre de mica. L'épaisseur équivalente du mica est d'environ 1 cm d'air, de manière à ce que les particules  $\alpha$  puissent passer à travers. Le tube contient une émanation équivalente, à peu près, à 20 milligrammes  $\text{RaBr}_2$  à la pression de quelques centimètres. Le nombre de particules  $\alpha$  attendu par seconde à travers la fenêtre était, par conséquent, très grand. L'écran de sulphate de zinc S était fixé derrière la plaque conductrice P, et dans une position telle qu'aucune particule  $\alpha$  ne pouvait la rencontrer directement. Quand un réflecteur était placé dans la position RR à environ 1 cm de l'extrémité du tube, les scintillations étaient alors observées. Pendant ce temps, l'écran brillait de manière appréciable en raison des particules  $\beta$  réfléchies.

- Résultats obtenus par Geiger et Marsden

TAB. 7 – Le rapport  $\frac{A}{Z}$  décroît avec le poids atomique. Le cas du plomb peut apparaître comme étant une exception qui pourrait être due à de faibles impuretés dans ce métal. Même en l'absence de réflecteur, environ une scintillation par minute était observée. Il est facile de montrer que ceci était dû à la réflexion par de l'air à travers lequel les particules  $\alpha$  passaient. Les nombres de ce tableau sont corrigés de cet effet.

Métal	Poids atomique, $A$	Nombre de scintillations par minute, $Z$	$\frac{A}{Z}$
Plomb	207	62	30
Or	197	67	34
Platine	195	63	33
Etain	119	34	28
Argent	108	27	25
Cuivre	64	14.5	23
Fer	56	10.2	18.5
Aluminium	27	3.4	12.5

Il est intéressant de noter ici que, pour les particules  $\beta$ , le nombre de particules réfléchies décroît également avec le poids atomique du réflecteur <sup>47</sup>. Mais tandis que pour les particules  $\beta$ , le nombre de particules réfléchies par de l'or est seulement deux fois plus grands que celui par de l'aluminium, le même rapport est d'environ 20 pour les particules  $\alpha$ .

<sup>45</sup>Regener, *Verh. d. D. Phys. Ges.*, **10**, p. 78, 1908.

<sup>46</sup>E. Rutherford & H. Geiger, *Proceedings of the Royal Society A*, **81**, p. 141, 1908.

<sup>47</sup>McClelland, *Dublin Transactions*, **9**, p. 9, 1906.

Cette dernière remarque n'est pas exploitée par Geiger et Marsden.

- Geiger et Marsden réalisent une série d'expériences avec des réflecteurs d'or d'épaisseur différente.
- Ils obtiennent alors un taux de scintillations qui varient selon une loi exponentielle, ce qui montre qu'il s'agit d'un **effet de volume** et non d'un volume de surface.
- Ceci avait été observés pour les particules  $\beta$ <sup>48</sup>. Ils commentent par ailleurs :

Comparés à l'épaisseur de l'or qu'une particule  $\alpha$  peut pénétrer, l'effet est confiné à une relativement fine couche. Dans notre expérience, environ la moitié des particules réfléchies sont réfléchies par une couche équivalente à 2 mm d'air. Si la grande vitesse et la masse des particules  $\alpha$  étaient prises en compte, **il semble surprenant que des particules  $\alpha$ , comme l'expérience le montre, peuvent être déviées au sein d'une couche de  $6 \times 10^{-5}$  cm d'or avec un angle de  $90^\circ$ , ou même plus.** Pour produire un effet similaire par un champ magnétique, le champ énorme de  $10^9$  en unités absolues devrait être requis.

- Une fois encore, Geiger et Marsden ne tentent pas de fournir une explication comme on le voit, par exemple, chez Thomson. Ils sont moins créatifs en termes d'images explicatives...
- Une autre expérience leur montre que le nombre de particules réfléchies ne varie pas significativement avec l'angle d'émergence.  $\Rightarrow$  mais pas d'explication !
- James A. Crowther (1889-1983) de Cambridge, donc proche de Thomson, étudie en 1910 la diffusion des particules  $\beta$ <sup>49</sup>.
- Crowther souhaite obtenir des informations supplémentaires sur la constitution de l'atome à travers le nombre d'électrons qu'il contient.
- La motivation à l'origine de ce travail réside dans les lois « anormale » observées pour l'absorption des rayons  $\beta$  :

Il était connu depuis très tôt que les rayons  $\beta$  d'une seule substance radioactive, telle que l'uranium X par exemple, étaient absorbés par des substances légères, telles que l'aluminium, selon une loi exponentielle. Pour les éléments plus lourds, tel que l'étain et le platine, la courbe d'absorption commence par décroître plutôt plus rapidement qu'une véritable exponentielle, mais devient finalement une exponentielle une fois que les rayons ont passés à travers une petite épaisseur de matériau absorbant. [...]

Très récemment, cependant, W. Wilson<sup>50</sup> a publié des résultats qui jettent quelques doutes sur ces deux conclusions. Au lieu de travailler avec les rayons  $\beta$  d'une seule substance radioactive, il utilisa un faisceau mixte de rayons du radium, employant un champ magnétique pour les arranger en une série de pinceaux presque homogènes...

[...] Dans un article précédent<sup>51</sup> j'ai montré que l'absorption d'un pinceau parallèle de rayons  $\beta$  pouvait être correctement divisée en deux étapes : premièrement, la diffusion du pinceau, et, deuxièmement, l'absorption plus graduelle des rayons diffus. Sans considérer pour le moment si les deux phénomènes sont réellement distincts, ou s'ils ne pourraient plutôt être deux expressions d'un même phénomène, nous pourrions les regarder comme un fait expérimental qu'**un faisceau parallèle de rayons  $\beta$  est considérablement diffusé dans une épaisseur de matériau trop petite pour produire une absorption appréciable d'un faisceau uniformément diffusé.**

- Approche reposant sur la théorie de la diffusion de particules électrisées se déplaçant rapidement récemment publiée par Thomson<sup>52</sup>.

<sup>48</sup>McClelland, *Philosophical Magazine*, **9**, 230, 1905 — *Annalen der Physik*, **18**, 974, 1905 — Schmidt, *Annalen der Physik*, **23**, 671, 1907 & *Physik Zeitschrift*, **8**, 737, 1907.

<sup>49</sup>J. A. Crowther, On the scattering of homogeneous  $\beta$ -rays and the number of electrons in the atom, *Proceedings of the Royal Society of London A*, **84**, 226-247, 1910.

<sup>50</sup>W. Wilson, *Proceedings of the Royal Society of London A*, **82**, 612, 1909.

<sup>51</sup>J. A. Crowther, *Proceedings of the Royal Society of London A*, **80**, 186, 1908.

<sup>52</sup>J. J. Thomson, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, **15**, Pt. 15, 1910.

- une particule  $\beta$  est déviée par un atome selon la manière avec laquelle la particule rencontre l'atome.
- la théorie est construite sur l'hypothèse que l'atome est constitué de corpuscules négatifs accompagnés par une égale quantité d'électrification positive

La déflexion des particules  $\beta$  résultera ainsi de deux causes :

1. la répulsion des corpuscules négatifs distribués au sein de l'atome ;
2. l'attraction de l'électrification positive.

La déviation due à cette dernière dépendra si l'électricité positive est distribuée uniformément à travers l'atome, ou si elle est divisée en petites unités.

- Thomson considère séparément chacune de ses hypothèses.
- Dans le cas où l'électricité positive est supposée comme étant répartie en petits « paquets », la quantité  $\sigma$  représentant *le rapport du volume occupé par l'électricité positive sur le volume de l'atome*, qui n'est pas connue, est utilisée :

Si nous supposons que les paquets [d'électricité positive] sont semblables en taille à celle des électrons négatifs,  $\sigma$  sera négligeablement petit. En tout cas, elle doit être plus petite que l'unité. En calculant les résultats reportés Tab. 9, nous avons supposé qu'elle pouvait être négligée.

- Première étape : « validation » de la théorie de Thomson
- Quelle que soit l'hypothèse sur l'électricité positive, le rapport  $\frac{mv^2}{e\sqrt{t_m}}$ , où  $t_m$  est l'épaisseur à mi-absorption, devait être constant, ce que Crowther vérifiera avec ces expériences (Tab. 8).

TAB. 8 – Variation de l'amplitude de la diffusion avec la vitesse des rayons. Cas de l'aluminium avec un angle de  $18^\circ$ . La première colonne donne le produit de l'amplitude du champ par le rayon de courbure du chemin, soit  $HR = \frac{mv}{e}$ . Le rapport  $\frac{mv^2}{e\sqrt{t_m}}$  est à peu près constant.

HR	$v$	$\frac{mv^2}{e}$	$t_m$ (cm)	$\frac{mv^2}{e\sqrt{t_m}}$
2260	$2.40 \times 10^{10}$	$5.41 \times 10^{13}$	0.00183	$1.26 \times 10^{15}$
2870	$2.58 \times 10^{10}$	$7.40 \times 10^{13}$	0.00406	$1.16 \times 10^{15}$
3420	$2.68 \times 10^{10}$	$9.15 \times 10^{13}$	0.0056	$1.23 \times 10^{15}$
4050	$2.77 \times 10^{10}$	$11.2 \times 10^{13}$	0.0084	$1.22 \times 10^{15}$
4840	$2.83 \times 10^{10}$	$13.7 \times 10^{13}$	0.0122	$1.25 \times 10^{15}$
6500	$2.90 \times 10^{10}$	$18.9 \times 10^{13}$	0.0226	$1.26 \times 10^{15}$

Ayant maintenant obtenu des évidences satisfaisantes que [...] la théorie du Prof. Thomson exprime les faits expérimentaux concernant la diffusion des rayons homogènes  $\beta$ , nous pouvons maintenant procéder à l'application de la détermination du nombre d'électrons contenus dans un atome des éléments variés concernés.

- Seconde étape : discrimination entre les deux hypothèses

  1. Electricité positive distribuée uniformément
  2. Electricité positive répartie par petits « paquets » à l'image des électrons

Puisque les deux expressions conduisent aux mêmes lois expérimentales, les expériences présentes, prises en elles-mêmes, ne nous permettent pas de décider entre elles. J'ai, par conséquent, calculé la valeur du nombre  $N_0$  de corpuscules dans l'atome, à

partir des deux expressions, et ces deux valeurs sont reportées Tab. 9. Nous verrons, cependant, lorsque nous serons amenés à considérer les résultats que, à la lumière d'autres expériences, nous devons regarder la première hypothèse comme celle donnant le vrai résultat.

TAB. 9 – Il est à noter que le rapport du nombre d'électrons au sein de l'atome sur le poids atomique, calculés sur l'hypothèse que l'électricité positive est distribuée uniformément à travers l'atome, est remarquablement constant ; à l'opposé, les résultats obtenus avec l'hypothèse selon laquelle l'électricité positive est dans une condition électronique dans l'atome, conduit à une rapide augmentation du rapport avec l'augmentation du poids atomique ; le rapport pour le platine étant environ neuf fois celui du carbone. Ceci reste vrai quelque soit la valeur de  $\sigma$  supposée.

Elément	Poids Atomique	$\frac{\phi}{\sqrt{t_m}}$	$N_0$		$\frac{N_0}{\text{Poids atomique}}$	
			uniforme	discrète	uniforme	discrète
Carbone	12	2.0	40	44	3.32	3.7
Aluminium	27	4.25	83	156	3.07	5.8
Cuivre	63.2	10.0	181	765	2.87	12.0
Argent	108	15.4	320	2080	2.96	19.2
Platine	194	29.0	605	6500	3.12	33.5

- Crowther obtient en moyenne trois électrons par unité du poids atomique.
- Il renforce toutefois ses résultats par des considérations sur la diffusion des rayons de Röntgen :

D'autres considérations, et en particulier d'une considération sur la diffusion des rayons de Röntgen par les gaz, il semble très probable que le nombre de corpuscules dans un atome est fortement proportionnel au poids atomique. Il a été montré<sup>53</sup> que [...] la quantité de radiations primaires diffusée par le gaz est simplement proportionnelle à la masse de gaz présente, et pratiquement indépendante de sa nature chimique. Ceci nous conduit pour une fois à la conclusion que **le nombre d'électrons présent au sein de l'atome est simplement proportionnel au poids atomique**. Ceci est tout de même incompatible avec cette importante augmentation dans le rapport de  $N_0$  au poids atomique donnée par [l'hypothèse discrète]. Nous devons conclure, par conséquent, que l'électricité positive au sein de l'atome n'est pas dans un état comparable à l'électron, mais qu'elle **occupe des volumes suffisamment grand pour être considérée comme étant distribuée uniformément sur l'ensemble de l'atome**.

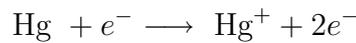
Les travaux de Thomson se poursuivent par la mise en évidence de deux types d'ionisation du Mercure<sup>54</sup>

1. les agents ionisants sont les corpuscules aux déplacements rapides qui constituent les rayons cathodiques ; ces très petites particules pénètrent dans l'atome et entrant en collision dans les cas favorables, causent le jaillissement du corpuscule qui s'échappe de l'atome ; ce type d'ionisation fait que l'atome perd une charge.
2. l'atome de mercure est éjecté par un **atome** se déplaçant rapidement et non par un **corpuscule** ; après la collision l'atome de mercure sort avec une vitesse très grande, qui n'est d'abord pas partagé par les corpuscules en son sein. La tendance des corpuscules à quitter l'atome dépend seulement de la vitesse relative entre l'atome et les corpuscules, de telle manière que l'effet ionisant produit par la collision est le même que si l'atome était au repos, et que **tous** les corpuscules se déplaçaient avec la vitesse acquise par l'atome lors de la collision.

<sup>53</sup>J. A. Crowther, *Philosophical Magazine*, **14**, 653, 1907.

<sup>54</sup>J. J. Thomson, Multiply-charged atoms, *Philosophical Magazine*, **24**, 618-672, 1912.

- $\Rightarrow$  Ainsi, s'il y a huit corpuscules dans l'atome de mercure, connectés avec la même fermeté à l'atome, le résultat de l'atome ayant acquis une grande vitesse dans la collision pourrait être le détachement d'un ensemble de huit [corpuscules] laissant l'atome avec une charge de huit unités **positives**.
- Thomson propose les deux réactions



- Thomson observe des atomes multichargés :

Tous les éléments que j'ai examinés donnent des atomes positifs multi-chargés à l'exception de l'hydrogène, sur lequel je n'ai jamais observé plus d'une charge ; dans aucun autre cas, je n'ai pas observé de charges approchant celles possédées par le mercure. La majorité des éléments semblent acquérir seulement deux charges ; c'est le nombre acquis par l'hélium, et ce cas est intéressant puisque dans les tubes à vide, l'atome d'hélium apparaît avec soit une charge simple, soit une charge double...

### 3.8 Le noyau ponctuel de Rutherford

En 1911, Rutherford reprend les derniers travaux obtenus par Geiger sur la déflexion des particules  $\alpha$  et  $\beta$  <sup>55</sup>.

- les particules passent à travers le système atomique,
- Il a été souvent supposé que la diffusion observée résulte d'une multitude de petites diffusions.
- Thomson a récemment avancé une théorie des petites diffusions,
- conclusion principale de la théorie a été expérimentalement examinée par Crowther pour les rayons  $\beta$
- Sur la base de cette théorie, l'atome est supposé consister en un sphère positive d'électrification contenant une quantité égale d'électricité négative sous la forme de corpuscules.
- Il y a, cependant, un nombre d'expérience de diffusion qui indiquent qu'une particule  $\alpha$  ou  $\beta$  subit occasionnellement une déflexion de plus de  $90^\circ$  en une seule rencontre <sup>56</sup>
- Une déflexion aussi grande ne peut être expliquée par une théorie prenant en compte l'amplitude des petites diffusions observées expérimentalement.
- Il semble certain que ces grandes déviations des particules  $\alpha$  sont produites par **une** rencontre atomique.

De manière à expliquer ces résultats et d'autres,

- $\Rightarrow$  il est nécessaire de supposer que les particules électrisés passent à travers des champs électriques intenses à l'intérieur de l'atome.
- La diffusion des particules électrisées s'explique par un atome qui serait constitué d'une charge électrique **concentrée en un point et entourée par une distribution sphérique uniforme d'électricité** opposée et égale en quantité.
- Avec cet arrangement atomique, des particules  $\alpha$  et  $\beta$ , lorsqu'elles passent près du centre de l'atome, subissent une grande déviation,
- A partir de considérations sur des résultats généraux sur la diffusion de différents matériaux, la charge centrale de l'atome est trouvée être à peu près **proportionnelle à son poids atomique**.
- La valeur exacte de la charge centrale n'a pas été déterminée, mais pour un atome d'or, cela correspond à environ 100 charges unitaires.
- les effets sont principalement contrôlés par les grandes diffusions, spécialement lorsque la fraction du nombre de particules diffusées à travers des angles considérables est petite.

<sup>55</sup>E. Rutherford, The scattering of the  $\alpha$  and  $\beta$  rays and the structure of the atom, *Memoires and Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society*, **55**, 18-20, 1911.

<sup>56</sup>H. Geiger & E. Marsden, On a diffuse reflection of the  $\alpha$ -particles, *Proceedings of the Royal Society of London*, **82**, 495-500, 1909.

- Les résultats obtenus par Crowther sont pour la plupart expliqués par cette théorie des grandes diffusions, bien qu’il n’y ait aucun doute qu’ils soient d’une certaine manière influencés par les petites diffusions.
- Il est conclu que pour différents matériaux, la fraction de particules diffusées à de grands angles est proportionnelle à  $NA^2$  où  $N$  est le nombre d’atomes par unité de volume, et  $A$  le poids atomique du matériau.
- Les principaux résultats des grandes diffusions sont indépendants du fait que la **charge centrale soit positive ou négative. Il n’a pas encore été possible de résoudre cette question du signe avec certitude.**

### 3.9 La quantification du moment cinétique de Nicholson

Quelques mois plus tard, John W. Nicholson (1881-1955) publia une série d’articles consacrés aux lignes spectrales des nébuleuses qui ne pouvaient être attribuées à l’hydrogène ou l’hélium.

- Il utilisa un élément hypothétique constitué d’un nucléon de charge  $4e$  et de 4 électrons tournant uniformément sur un cercle centré sur le nucléon : il appelle cet élément hypothétique le “*nebulium*”.
- se base sur l’article de Thomson<sup>57</sup> et celui de Nagaoka de la même année<sup>58</sup>.
  - La principale conception impliquée dans la structure des atomes simples est celle de l’électricité positive.
  - Elle est supposée exister dans **un petit volume sphérique dont la distribution est une densité uniforme, et dont le rayon est petit** même en comparaison avec celui d’un électron, à l’opposé de la conception la plus généralement acceptée.
  - La masse de ces unités positives est très grande en comparaison de celle d’un électron, et contribue à peu près à l’ensemble de la masse de l’atome.
- L’atome de *nebulium*, un élément hypothétique prédit par la théorie, lorsqu’il est électriquement neutre, contient quatre électrons, chacun avec une charge  $-e$  tournant uniformément à égales distances sur un cercle autour d’un nucléon positif dont la charge est  $4e$ .
- Si un électron est manquant, les trois autres peuvent prendre place à des positions équidistantes et tourner sur une nouvelle orbite, le système étant alors constitué d’un atome de nébulium avec une simple charge positive.
- De manière semblable, **l’atome peut recevoir plus d’électrons et acquérir une charge négative. Mais il doit encore être regardé comme du nébulium si la charge positive reste la même.**
- Nous devrions adopter la vue habituelle que les nébuleuses sont dans un état d’excitation électrique plutôt qu’à une haute température, ainsi les atomes des gaz les composant perdent et gagnent continuellement des électrons.
- Il est par conséquent attendu que le spectre de l’un de ces gaz devrait montrer des raies correspondant aux vibrations d’un atome neutre, d’un atome avec une ou plusieurs charges positives et du même atome avec des charges négatives.
- les électrons sont placés dans un plan, de manière à ce que leur énergie ne puisse pas être dissipée par des radiations rapides. Les vibrations du système dynamique constitué par l’atome peuvent prendre place soit dans ce plan, soit perpendiculairement à ce plan.
- Nicholson insista sur les vibrations perpendiculaires au plan, *puisque elles apparaissent être les plus importantes pour le spectre visible.*
- Le modèle est constitué de  $n$  électrons de charge  $e$  dans un mouvement circulaire stable autour d’un nucléon positif de charge  $\nu e$ , le rayon de l’orbite étant  $a$ .
- seulement les forces d’origines électrostatiques sont considérées

<sup>57</sup>J. J. Thomson, *Philosophical Magazine*, March 1904.

<sup>58</sup>H. Nagaoka, Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity, *Philosophical Magazine*, Series 6, 7, 445-455, 1904.

– si la rotation de l’anneau n’est pas trop rapide en comparaison de la vitesse de la lumière, la différence est petite.

⇒ Il justifie ainsi que c’est l’effet perpendiculaire qui est prépondérant :

– Pour l’atome neutre de nébulium, Nicholson trouve que la pulsation  $\omega$  est donnée par

$$ma\omega^2 = \frac{e^2}{a^2} \left( \nu - \frac{S_n}{4} \right) \quad (5)$$

– le premier terme correspond aux interactions avec le nucléon positif

– le second terme correspond à l’influence des autres électrons

– pour  $n = 4$ ,  $S_n = 1 + 2\sqrt{2}$ , soit

$$\omega^2 = \frac{e^2}{ma^3} \left( \nu - \frac{1 + 2\sqrt{2}}{4} \right) \quad (6)$$

– si  $\eta$  est la racine  $n^{\text{ème}}$  de l’unité écrite sous la forme complexe

$$\eta = \cos \left( 2\kappa \frac{\pi}{n} \right) + i \sin \left( 2\kappa \frac{\pi}{n} \right) \quad \text{pour } \kappa = (0, 1, 2, 3)$$

où l’entier  $\kappa$  désigne l’électron concerné

– pour le nébulium neutre :

$\kappa$	$\frac{q^2}{\omega^2}$	$\frac{q}{\omega}$
0	$\frac{16}{15 - 2\sqrt{2}}$	1.146533
1 ou 3	1	1
2	$\frac{8}{8 + \sqrt{2}}$	0.921835

selon l’électron considéré <sup>59</sup>.

– mais les périodes doivent être calculées relativement à l’observateur

– Une onde de classe  $\kappa$  se propage sur l’anneau avec une vitesse  $\frac{q}{\kappa}$ , et la fréquence qui se manifeste à un observateur n’est pas  $q$ , mais  $q + \kappa\omega$ , où  $\kappa$  peut être positif ou négatif selon le sens avec lequel l’onde se propage, soit selon le mouvement général des électrons, soit dans le sens opposé

– ⇒

$$\frac{q'}{\omega} = \left\{ \begin{array}{cccc} 1.146534, & 2, & 2.921835, & 4 \\ \kappa = 0 & \kappa = 1 & \kappa = 2 & \kappa = 3 \end{array} \right\}$$

et pour les valeurs négatives, il y a un jeu de fréquences

$$\frac{q''}{\omega} = \left\{ \begin{array}{cccc} 1.146534, & 0, & 1.078165, & 2 \\ \kappa = 0 & \kappa = -1 & \kappa = -2 & \kappa = -3 \end{array} \right\}$$

– L’ensemble complet, excepté  $\kappa = 0$ , devient

$$\frac{q}{\omega} = \{1.078165, \quad 1.146534, \quad 2, \quad 2.921835, \quad 4\}$$

avec les longueurs d’onde correspondantes <sup>60</sup>

<sup>59</sup>La valeur donnée pour le rapport  $\frac{q}{\omega}$  pour  $\kappa = 2$  correspond en fait à la valeur du rapport  $\frac{q^2}{\omega^2}$ .

<sup>60</sup>Selon son erreur de calcul, Nicholson parvient à la série de longueurs d’ondes

$$\lambda = \frac{2\pi C}{\omega} \{0.87219, \quad 0.86939, \quad 0.5, \quad 0.35090, \quad 0.25\}$$

$$\lambda = \frac{2\pi C}{\omega} \{0.92750, \quad 0.87219, \quad 0.5, \quad 0.35090, \quad 0.25\}$$

- Selon Nicholson, seules les premières de ces vibrations sont dures, et les secondes trop faibles pour être observées.
- Si la première ou la seconde est dans le spectre visible, les trois autres ne peuvent l'être, ne nécessitant pas de plus amples considérations, et l'attention peut être limitée à la première paire, les classes zéro et -2, le second étant peut-être invisible.
- La vibration de classe zéro, est aussi la période apparente à l'observateur.
- Nous avons par conséquent trois vibrations capables d'apparaître dans le spectre visible, de longueur d'onde

$$\lambda = \frac{2\pi C}{\omega} \{1.0, \quad 0.92750, \quad 0.87219\}$$

et les deux premières devraient être dures.<sup>61</sup>

- Nous devons maintenant montrer que les rapports de ces deux [longueurs d'onde] sont identiques à celles des deux raies importantes des nébuleuses.
- raies principales des nébuleuses  $\lambda = 5006.9$  et la raie  $\lambda = 4363.3$ .  $\Rightarrow$  valeurs finalement adoptée Wright<sup>62</sup>,
- 1ère raie  $\lambda = 5006.9$ , la seconde devrait avoir une longueur d'onde  $5006.9 \times 0.872184 = 4367.0$ , avec une erreur de seulement  $3.6 \cdot 10^{-10}$  mètre.
- Notons que la valeur corrigée

$$5006.9 \times 0.92750 = 4643.9$$

ne correspond à aucune des raies identifiées par Wright.

- La raie la plus proche de la valeur alors obtenue est 4685.73, ce qui semble être trop loin de la valeur attendue.
- elle pourrait correspondre à des vibrations de l'atome dans son propre plan, *bien que la majorité de celles-ci, aussi loin que l'étude encore en cours a déjà pu l'indiquer, semble être hors du spectre visible.*
- Nicholson estime ensuite une taille de l'atome à partir de la raie principale

$$\frac{2\pi C}{\omega} = 5007 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

d'où il estime la vitesse angulaire dans l'atome égale à

$$\frac{\omega}{C} = 1.255 \cdot 10^5$$

- rayon de l'orbite du nébulium<sup>63</sup>

$$a = 3.453 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

*C'est le rayon de l'atome de nébulium*, et il est en complet accord avec les estimations courantes des rayons atomiques, qui donnent  $10^{-8}$  comme représentant l'ordre de grandeur.

Puisque  $\omega = 1.255 \cdot 10^5 C$ , la vitesse d'un électron est

$$a\omega = 4.33 \cdot 10^{-3} C$$

<sup>61</sup>Nous avons ici une contradiction entre le texte de Nicholson. La valeur corrigée s'intercale en effet entre la première et la deuxième, puisque la valeur 0.86939 devient, après correction, 0.92750. Nicholson ne va donc considérer que les longueurs 1.0 et 0.87219.

<sup>62</sup>W. H. Wright, *Astrophysical Journal*, **16**, 1902.

<sup>63</sup>Le nébulium correspond en fait au Béryllium (Be) de numéro atomique 4 et de masse atomique 9.0122. Son rayon est ici supérieur au rayon de l'orbite de l'atome d'hydrogène que trouvera Bohr, soit  $0.53 \cdot 10^{-8}$  m.

et

$$\frac{\text{vitesse de l'électron}}{\text{vitesse de la lumière}} = 0.00433,$$

ce qui est très petit. L'erreur dans la présente étude ne peut par conséquent excéder environ 4 pour mille

C'est une précision suffisante, et la présente étude est suffisante, sans les ordres supérieurs, pour montrer que le nébulium peut être la source de la plupart des raies nébuleuses.

TAB. 10 – Tableau récapitulatif de la description du spectre des nébuleuses Orion, G.C. 4390, G.C. 4964, N.G.C. 7027 qui contenaient onze raies d'origine inconnue. Ces dernières pourraient être associées à la même substance. Le nébulium neutre est représenté par le symbole Nu, les signes + et - dénotant les charges électriques qu'ils contiennent.

Raie nébuleuse	Identification	Raie nébuleuse	Identification
3726.4	Nu <sup>+</sup>	4101.91	H <sub>δ</sub>
3729.0	...	4340.62	H <sub>γ</sub>
3835.8	H <sub>η</sub> , Nu <sup>-</sup> , Nu <sup>++</sup> , (?)	4353.37	Nu
3868.88	Nu <sup>-</sup>	4371.71	Helium
3889.14	H <sub>ζ</sub>	4685.73	...
3965.1	Helium	4740.0	Nu <sup>--</sup>
3967.65	Nu <sup>++</sup>	4861.54	H <sub>β</sub>
3970.23	H <sub>ε</sub>	4959.05	Nu <sup>--</sup>
4026.7	Helium?, Nu <sup>+</sup>	5006.89	Nu
4068.8	Nu <sup>--</sup>	...	...

## – Conclusion

L'hypothétique atome de nébulium décrit au début de cet article est capable de prendre en compte à tout niveau la plus grande part du spectre des nébuleuses. Il pourrait être montré que des atomes d'un type semblable pourraient tout aussi bien expliquer le spectre de la couronne solaire.

Dans le second article sur la constitution de la couronne solaire <sup>64</sup>

La constante de la nature selon laquelle ces spectres peuvent être exprimés apparaît être celle de Planck au sein de sa récente théorie quantique de l'énergie. Il est évident que les modèles d'atomes avec lesquels nous travaillons ont plusieurs des caractéristiques essentielles des « résonateurs » de Planck. Ils possèdent une fréquence principale  $\frac{\omega}{2\pi}$ , où  $\omega$  est la vitesse angulaire des électrons à l'intérieur de l'atome, et nous avons vu, dans la discussion des spectres, que c'est ordinairement la fréquence d'une raie dure dans le spectre d'un atome. [...] Ceci établit que l'énergie possédée par un résonateur est de la forme  $nh\nu$ , où  $\nu$  est la fréquence du résonateur,  $n$  est un nombre entier, et  $h$  est une constante universelle de la nature, dont la valeur, dérivée par Planck de mesures du rayonnement du corps noir, est

$$h = 6.548 \cdot 10^{-27} \text{ erg seconds}$$

En d'autres termes, **les échanges d'énergie ne sont pas continus,**

- Les échanges d'énergie sont, de plus, régulés en amplitude par les fréquences des systèmes concernés d'une curieuse manière.
- **cette étude servira le double objectif de confirmer l'origine suggérée des spectres en astrophysique, et de donner à la théorie de Planck une fondation atomique :** une fondation du type qui est maintenant généralement crue être nécessaire, donnant une image concrète de la nature possible d'un résonateur.

<sup>64</sup>J. W. Nicholson, The constitution of the Solar corona. II, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **72**, 677-692, 1912.

- seuls les échanges d'énergie, ou l'énergie relative à une configuration standard, peuvent être étudiés
- Proto-fluorine  $\nu = 5$  soit le Bore...
- énergie de la proto-fluorine

$$mna^2\omega^2 \cdot \frac{2\pi}{\omega} = 154.94 \cdot 10^{-27}$$

ce qui représente une quantité peu différente de  $25h$

- *comme cela est nécessaire pour une théorie complète, le rapport de l'énergie est exactement 25 de ces unités.*
- moment angulaire de l'électron  $\propto mna^2\omega^2$
- Si, par conséquent, la constante  $h$  de Planck a, comme Sommerfeld l'a suggéré, une signification atomique, il pourrait signifier que **le moment angulaire d'un atome peut seulement augmenter ou chuter par quantités discrètes lorsque les électrons le quittent ou y retournent.**
- pour les différents atomes de proto-fluorine

proto-fluorine	$\lambda$	E	E (en unité de Planck)
$n = 5$ (neutre)	3987.1	187.04	25
$n = 4$	4231	164.19	22
$n = 3$	4586	134.29	18

- Ces trois rapports constituent les trois termes de la séquence harmonique

$$25, \quad 22, \quad 18, \quad 13, \quad 7, \quad 0$$

*qui, si la suite était valide, ne donnerait aucune unité au nucléon positif seul, comme cela serait attendu si l'énergie intrinsèque était négligée.*

Le nombre d'unités *par électrons* du rapport  $\frac{\text{énergie}}{\text{fréquence}}$  deviendrait, pour les cinq systèmes en question,

$$5, \quad 5\frac{1}{2}, \quad 6, \quad 6\frac{1}{2}, \quad 7,$$

mettant en évidence une augmentation régulière, ainsi, si la valeur était valide, la valeur de  $mna^2\omega \cdot 2\pi$  pour le système avec  $n$  électrons et une fréquence principale  $f$  serait

$$\frac{1}{2}(15 - n)nfh$$

et il deviendrait possible d'exprimer l'ensemble du spectre de la proto-fluorine sous la forme d'une série, ou un jeu de séries, dépendant de nombres naturels, bien que la série n'est pas des types de Balmer, Kayser et Runge, ou Rydberg. Ces séries, cependant, relient les éléments dont la structure est plus compliquée qu'un système à un simple anneau.

## 4 Le modèle de Bohr

en 1912, Bohr rejoint Rutherford à Manchester après avoir séjourné à Cambridge dans le laboratoire de Thomson. De plus, c'est Rutherford qui communique l'article de Bohr. Il s'agit d'un bel exemple d'influence sur la perception des contributions respectives de divers scientifiques.

De manière à expliquer les résultats des expériences sur la diffusion des rayons  $\alpha$  par la matière, Prof. Rutherford <sup>65</sup> a donné une théorie de la structure des atomes. Selon cette

<sup>65</sup>E. Rutherford, *Philosophical Magazine*, **21**, 668, 1911.

théorie, les atomes consistent en un nucléon positivement chargé entouré par un système d'électrons maintenus ensemble par des forces attractives du nucléon ; la charge totale négative des électrons est égale à la charge positive du nucléon. De plus, le nucléon est supposé être le siège de la partie essentielle de la masse de l'atome, et avoir des dimensions linéaires excessivement petites comparativement avec les dimensions de l'ensemble de l'atome. Le nombre d'électrons dans un atome est déduit être approximativement égal à la moitié du poids atomique. Un grand intérêt est attribué à ce modèle d'atome ; comme Rutherford l'a montré, l'hypothèse de l'existence de nucléons semble être nécessaire pour prendre en compte les résultats des expériences au grands angles de diffusion pour les rayons  $\alpha$  <sup>66</sup>.

- Bohr cite dans son introduction un article de Rutherford (1911)
- Ce sont les expériences de Geiger et Marsden mais en citant un article de 1913 et non celui des expériences de 1909, ce qui laisse l'antériorité à Rutherford !
- Bohr fait une comparaison entre le modèle de Rutherford et celui de Thomson — celui de 1904 qui ne fait référence qu'à une sphère de charge positive —, renforçant ainsi les différences entre l'approche de Thomson et celle de Rutherford, pas nécessairement à l'avantage de Rutherford...

il semble nécessaire d'introduire dans les lois en questions une quantité étrangère à l'électro-dynamique classique, c'est-à-dire la constante de Planck, ou comme il est souvent appelé, le quantum élémentaire d'action. Par l'introduction de cette quantité, la question de la configuration stable des électrons dans les atomes est profondément changée, de telle manière que cette constante est d'une dimension et d'une grandeur telles que, avec la masse et la charge des particules, peut déterminer une longueur de l'ordre de grandeur requise.

- Objectifs que Nicholson avait partiellement atteint mais qui ne sont pas mentionnés ici.
- Cet article est un essai de montrer que **l'application des idées du modèle de l'atome de Rutherford fournit une base pour une théorie de la constitution des atomes.**
- puis Bohr remercie Rutherford pour son intérêt encourageant porté sur son travail !
- Les hypothèses de Bohr
  - masse de l'électron négligeable devant celle du nucléon ;
  - vitesse de l'électron est petite devant celle de la lumière.
- plus novateur, il n'y a pas d'énergie de rayonnement, ce qui conduit à une orbite elliptique stationnaire dont la fréquence de révolution  $\omega$  et le grand axe est *2a qui dépendront de la quantité d'énergie W qui doit être transférée au système de manière à éjecter l'électron à une distance infiniment grande du nucléon.*
- Après avoir expliqué que l'électron ne pouvait rayonner continuellement alors que globalement la matière est à l'équilibre, il expose le point important de la théorie de Planck

le point essentiel de la théorie de Planck sur le rayonnement est que l'énergie de radiation d'un système atomique ne prend pas place d'une manière continue comme cela est supposé dans la théorie électro-dynamique classique, mais que, au contraire, elle prend place selon des émissions distincts séparées, la quantité d'énergie rayonnée d'un vibrateur atomique de fréquence  $\nu$  en **une seule émission** étant égale à  $\tau h\nu$ , où  $\tau$  est un nombre entier et  $h$  est une constante universelle

- démarche radicalement différente de celles de ces prédécesseurs : plutôt que de considérer un système avec plusieurs électrons, il étudie un atome constitué d'un seul électron tournant autour d'un nucléon
- L'électron est initialement pris à très grande distance du nucléon et l'orbite est supposée circulaire
- nouvelle hypothèse

---

<sup>66\*</sup> See also H. Geiger & E. Marsden, *Philosophical Magazine*, April 1913.

durant la fixation d'un électron, un rayonnement homogène est émis à une fréquence  $\nu$ , égale à la moitié de la fréquence de révolution d'un électron sur son orbite finale; ensuite, selon la théorie de Planck, nous sommes en mesure d'espérer que la quantité d'énergie émise par le processus considéré est égale à  $\tau h\nu$ , où  $h$  est la constante de Planck et  $\tau$  un nombre entier

– Bohr obtient alors :

$$\left\{ \begin{array}{ll} W = \frac{2\pi^2 m e^2 E^2}{\tau^2 h^2} & \text{énergie} \\ \omega = \frac{4\pi^2 m e^2 E^2}{\tau^3 h^3} & \text{fréquence} \\ 2a = \frac{\tau^2 h^2}{2\pi^2 m e E} & \text{grand axe} \end{array} \right.$$

où  $W = \tau h \frac{\omega}{2}$

– Ces expressions dépendent des différentes valeurs entières que peut prendre  $\tau$ . Alors une série de valeurs pour  $W$ ,  $\omega$  et  $a$  est obtenue.

nous sommes conduit à supposer que ces configurations correspondront à des états du système dans lequel **il n'y pas d'énergie de rayonnement ; les états se donc stationnaires aussi longtemps que le système n'est pas perturbé de l'extérieur**. Nous voyons que la valeur de  $W$  est la plus grande lorsque  $\tau$  a sa plus petite valeur 1. Ce cas correspond par conséquent à l'état le plus stable du système, c'est-à-dire qu'il correspondra à la fixation d'un électron dont la rupture nécessite la plus grande quantité d'énergie.

– il obtient alors

$$2a = 1.1 \cdot 10^{-8} \text{ cm}, \quad \omega = 6.2 \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{sec}}, \quad \frac{W}{e} = 13 \text{ volt.}$$

Nous voyons que ces valeurs sont du même ordre de grandeur que les dimensions linéaires des atomes, des fréquences optiques et des potentiels d'ionisation.

- L'importance générale de la théorie de Planck pour la discussion du comportement des systèmes atomiques a été initialement remarqué par Einstein
- Les considérations d'Einstein ont été développées et appliquées à de nombreux phénomènes différents, spécialement par Stark, Nernst et Sommerfeld
- l'accord entre leurs observées pour les fréquences et les dimensions de l'atome, et les valeurs de ces quantités calculées par des considérations semblables à celles utilisées ci-dessus, a été le sujet de beaucoup de discussions.
- Arthur Haas (1910), A. Shidlof (1911), Von E. Wertheimer (1911), Haber (1911)...
- mention des travaux de Nicholson par Bohr
  - Dans une série d'articles, cet auteur a montré qu'il semble possible de prendre en compte les raies d'origine jusqu'ici inconnue dans le spectre des nébuleuses stellaires et de la couronne solaire
  - Nicholson a obtenu une relation à la théorie de Planck montrant que le rapport entre la longueur d'onde des différentes jeux de raies du spectre coronaire peut être pris en compte avec grande précision en supposant que le rapport entre l'énergie du système et la fréquence de rotation de l'anneau est égal à un entier multiple de la constante de Planck.
  - **La quantité à laquelle Nicholson se réfère pour l'énergie est égale à deux fois la quantité que nous avons dénoté ici par  $W$ .**
  - Dans le dernier article cité, Nicholson a trouvé nécessaire de donner à la théorie une forme plus compliquée, représentant encore le rapport entre l'énergie et la fréquence par une simple fonction de nombre entiers.

- L'excellent accord entre les valeurs calculées et observées des rapports entre les longueurs d'onde en question semble un fort argument en faveur des bases des calculs de Nicholson.
- objections connectées au problème de l'homogénéité du rayonnement émis
  - Selon les calculs de Nicholson la fréquence des raies dans un spectre est identifiée à la fréquence de vibration d'un système mécanique dans un état d'équilibre
  - mais puisqu'une relation avec la théorie de Planck est utilisée, nous devrions supposer que le rayonnement est envoyé par quanta
  - les systèmes comme ceux considérés, dans lequel la fréquence est fonction de l'énergie, ne peuvent émettre une quantité finie de rayonnement homogène; aussi, aussitôt que l'émission du rayonnement est commencée, l'énergie et la fréquence du système sont altérées
- A part ces objections — qui peuvent être seulement formelles — il doit être remarqué, que la théorie dans sa forme donnée ne semble pas capable de prendre en compte les lois bien-connues de Balmer et Rydberg liant les fréquences des raies dans les spectres d'éléments ordinaires