

Il y a cent ans : la découverte de l'électron ¹

Pierre Marage
Chargé de cours à l'ULB
Physique des particules élémentaires
/ histoire des sciences
Le 16 octobre 1997

Il y a cent ans, Joseph John Thomson découvrait l'électron, la première particule élémentaire connue, ce qui lui valut le prix Nobel en 1906. « J.J. » comme l'appelaient ses élèves, né en 1856 (il mourut en 1940), professeur de physique expérimentale et directeur du laboratoire Cavendish à Cambridge, montra en effet en 1897 que les « rayons cathodiques » observés dans les tubes à vide sont formés de corpuscules chargés négativement, dont il mesura le rapport e/m de la charge à la masse.

Rien de plus évident, en principe, que la découverte de Thomson. Pourtant, celle-ci ne se résume pas à une expérience, si bien menée soit-elle. Elle est l'aboutissement de toute une histoire, et le point de départ d'une histoire nouvelle. D'une certaine manière, nous continuons à « découvrir » l'électron aujourd'hui...

L'expérience de Thomson

L'appareil construit par Thomson et son assistant (car lui-même était d'une maladresse légendaire) est représenté à la figure 1 et illustré par le schéma de la figure 2, extrait de son propre article.

Il s'agit d'une ampoule longue d'une trentaine de cm., dans laquelle a été réalisé le meilleur vide possible et où ne règne qu'une pression de l'ordre du centième de mm. de mercure. La cathode métallique C est raccordée à un potentiel négatif de quelques milliers de volts; l'anode est formée de deux anneaux métalliques A et B, raccordés à la terre et percés seulement de fentes étroites qui servent de collimateurs. On observe que des « rayons cathodiques » sont émis par C et qu'ils produisent une tache phosphorescente sur la paroi opposée du tube.

A l'extérieur du tube, Thomson a disposé un électroaimant dont les lignes de champ sont horizontales, ce qui a pour effet de défléchir les rayons dans le plan vertical. A l'intérieur même du tube à vide sont placées deux plaques parallèles d'aluminium, D et E, raccordées aux pôles opposés d'une batterie de piles, avec une différence de potentiel de 200 à 400 volts. Elles créent un champ électrique, qui défléchit également le faisceau dans le plan vertical. Selon Thomson, ceci prouve que les « rayons » sont formés de *corpuscules* chargés d'électricité négative, arrachés à la cathode par la grande différence de potentiel avec l'anode. Ce sont ces « corpuscules » que nous appelons aujourd'hui *électrons*.

Pour étudier les caractéristiques des corpuscules, Thomson mesure d'abord la valeur du champ magnétique qui permet d'annuler exactement l'effet du champ électrique. Il débranche

¹ Publié dans : « L'Echo des Savants » organe des Jeunesses scientifiques de Belgique n° 270, nov.-déc. 1997, pp. 15-18.

alors son électroaimant et mesure la déflexion due au seul champ électrique. Connaissant les valeurs des champs électrique et magnétique, il peut calculer le rapport e/m , qui vaut environ 1800 fois celui mesuré pour les ions H^+ de l'hydrogène. Il vérifia que cette valeur ne dépendait pas du gaz ni de la nature de la cathode.

Ainsi, avec l'expérience de Thomson, l'électron est, paraît-il, « découvert » ! Avant l'expérience, pas d'électron; après l'expérience, l'électron est parmi nous. Mais est-ce si simple ?

Toute une histoire ...

On imagine facilement que l'expérience de Thomson ne tombe pas du ciel. Elle est le fruit d'une histoire déjà longue, où s'entremêlent progrès techniques, expériences variées et théories contradictoires.

Les origines en remontent à la fin du XVIIème siècle, peu après l'invention des pompes à vides et des machines électrostatiques, qui ont permis d'observer la présence de décharges lumineuses dans les gaz raréfiés, sous l'influence de l'électricité. Le grand Faraday reprit ces études vers 1838, mais ce n'est qu'en 1859 que l'on observa pour la première fois les rayons cathodiques, grâce au vide plus poussé obtenu avec la pompe à mercure nouvellement inventée. Parmi d'autres expérimentateurs, Crookes put montrer en 1879 que ces rayons se propagent en ligne droite, en observant l'ombre qu'une croix placée dans le tube projetait sur l'extrémité opposée à la cathode.

Mais une polémique n'allait pas tarder à se développer. Crookes pensait que les rayons étaient formés de particules matérielles portant de l'électricité, mais plusieurs chercheurs allemands étaient d'un avis contraire et pensaient que les rayons étaient neutres, de nature ondulatoire et apparentés à la lumière. Parmi eux, Hertz, le découvreur des ondes électromagnétiques, faisait valoir qu'il n'avait pas pu observer de déviation des rayons dans un champ électrique; en fait, le vide qui régnait dans ses tubes était insuffisant, moins bon que celui que parvint à réaliser Thomson, et le gaz restant s'ionisait, détruisant les effets du champ. Pour sa part, son élève Lenard montra en 1894 que les rayons pouvaient traverser une fenêtre métallique très fine, qui aurait dû, selon lui, arrêter toute particule matérielle.

En 1895, Jean Perrin disposa à l'intérieur du tube un cylindre métallique muni d'un électromètre, et montra que les rayons étaient chargés négativement. On objecta que les charges pouvaient être dues à un phénomène secondaire d'émission à la cathode, mais Thomson perfectionna bientôt l'expérience de Perrin en défléchissant d'abord les rayons dans un champ magnétique, prouvant ainsi directement que les charges recueillies provenaient bien des rayons (voir figure 3).

La nature corpusculaire des rayons cathodiques semblait ainsi démontrée. Mais avait-on démontré la nature corpusculaire *de l'électricité*, et avait-on « découvert » l'électron ? Non, il fallait davantage, et notamment préciser les propriétés des « corpuscules », d'où l'importance de la mesure de e/m dans l'expérience qui a été décrite ci-dessus.

En soi une telle mesure ne suffisait cependant pas. Il fallait encore *interpréter* ce que l'on mesurait. Ainsi, en Allemagne, Kauffman procéda à une mesure de e/m pratiquement en même temps que Thomson, mais il était troublé par le fait que ce rapport était deux mille fois plus grand que pour l'ion le plus léger (l'ion H^+), car il pensait que les rayons cathodiques

étaient en fait des sortes d'ions. Il ne comprit donc pas ce qu'il voyait, et ne fut pas considéré comme le « découvreur » de l'électron

Le mérite de Thomson, en plus de la précision et de l'imagination de ses expériences, fut d'avoir su s'arracher à cette approche conventionnelle. Préparé par sa formation et ses recherches précédentes, il formula avec audace l'hypothèse qu'il avait affaire à « un nouvel état de la matière », et il suggéra que ses « corpuscules » étaient de beaucoup plus petite dimension que la matière habituelle, ce qui expliquait leur capacité à traverser les fenêtres métalliques.

Expérience et théorie

Mais il ne suffisait pas que Thomson dise « j'ai découvert un nouvel état de la matière » pour qu'il soit cru, et que soit acceptée l'idée qu'existait quelque chose comme ce que nous appelons aujourd'hui des « électrons ».

En effet, il faut se rendre compte que nos idées actuelles sur la structure atomique de la matière et de l'électricité n'étaient pas du tout généralement admises à la fin du XIX^{ème} siècle. Même si Dalton et Avogadro avaient formulé l'hypothèse atomiste 80 ou 90 ans plus tôt, de nombreux physiciens et surtout chimistes de premier plan refusaient cette hypothèse comme non fondée. L'hypothèse atomiste ne l'emporta vraiment qu'après que Perrin eut montré en 1911 que pas moins de treize méthodes différentes donnaient la même valeur pour le nombre d'Avogadro.

Pour que soit acceptée l'hypothèse révolutionnaire de Thomson concernant ce qu'il avait observé, il fallait donc – comme toujours en histoire des sciences – d'autres arguments, d'autres « pièces à conviction » venant soit de la théorie, soit d'autres expériences. De tels arguments furent fournis par la théorie électromagnétique présentée par Lorentz et par son interprétation de l'observation toute récente de l'effet Zeeman.

Pendant longtemps, on avait assimilé l'électricité à une sorte de fluide que l'on pourrait recueillir comme dans une bouteille (la fameuse « bouteille de Leyde », qui est un condensateur). La théorie moderne unifiée de l'électricité et du magnétisme fut créée vers 1865 par Maxwell, mais elle apparaissait très compliquée et mathématique. Elle fut diffusée en Allemagne par Hertz et en France par Poincaré. Et surtout, elle fut mise sous une forme beaucoup plus claire par le hollandais Lorentz, qui joua pendant des décennies le rôle d'un « sage » de la physique, notamment en présidant les Conseils Solvay. Lorentz expliquait tous les phénomènes électriques et magnétiques, dans le cadre de la théorie de Maxwell, par l'interaction de particules d'électricité (les « électrons ») et de l'éther qui remplissait tout l'espace et propageait ces effets. Mais sa théorie manquait de support expérimental...

En 1896, dans cette période bouillonnante de l'histoire de la physique expérimentale illustrée par la découverte des rayons X en 1895 et celle de la radioactivité en 1898, la théorie de Lorentz remporta son premier grand succès. P. Zeeman, un élève de Lorentz, constata que la présence d'un champ magnétique puissant avait pour effet de modifier la forme des raies lumineuses émises par un corps (les « raies spectrales »). Aussitôt, Lorentz donna l'explication du phénomène dans le cadre de sa théorie de l'électron, et en déduisit la première estimation de la masse de l'électron, environ 2000 fois plus petite que celle de l'atome d'hydrogène. Pourtant, on ne parle pas ici de « découverte » de l'électron, car les effets observés sont indirects, et leur interprétation repose trop sur une théorie particulière.

Mais dès que les résultats de Thomson furent connus, Lorentz ne manqua pas d'assimiler ses électrons aux « corpuscules » de Thomson, d'autant plus que les masses étaient du même ordre, du moins si l'on admettait que la charge du « corpuscule » était la même que celle de l'ion monovalent d'hydrogène.

Dès lors, la théorie de Maxwell-Lorentz et la découverte de Thomson se soutinrent mutuellement. Cela suffisait-il à ce que soit reconnue la « découverte » de l'électron ? Symboliquement et rétrospectivement, oui. A l'époque, dans le mouvement même de la science en train de se faire, il fallait d'autres indices encore...

L'électron gagne de la réalité

De fait, de nouveaux résultats expérimentaux vinrent bientôt « donner du corps » à la découverte de Thomson.

D'abord, des mesures directes de la charge de l'électron furent réalisées au laboratoire Cavendish, grâce à la première utilisation de « chambres à brouillard » inventées par C.T.R. Wilson. Celui-ci avait remarqué que, dans une vapeur sursaturée, des gouttelettes de brouillard se forment autour des particules électrisées. En récoltant l'eau provenant de ces gouttelettes, en mesurant la charge correspondante totale, et connaissant la taille moyenne des gouttelettes, Thomson et Wilson purent – c'est presque un miracle d'habileté expérimentale – mesurer avec une bonne précision la charge de l'électron. Des mesures très précises furent réalisées par la suite par l'américain Millikan, qui mesura la vitesse extrêmement lente de chute dans un champ électrique de gouttelettes d'huile chargées d'un ou de quelques électrons.

Par ailleurs, il apparut que l'existence de l'électron n'était pas confinée aux seuls rayons cathodiques, mais on en découvrit dans d'autres phénomènes. Ainsi, la valeur de e/m mesurée pour les rayons cathodiques, aussi bien dans le tube que pour les rayons sortis du tube à travers une fenêtre mince, fut retrouvée pour les corpuscules émis par des métaux fortement chauffés (effet thermoionique) ou par des métaux bombardés par la lumière ultraviolette (effet photoélectrique). Ces travaux furent réalisés notamment par Lenard, par Thomson lui-même et par certains de ses étudiants.

Surtout, une confirmation importante de la « réalité » des électrons vint du domaine tout nouveau de la radioactivité. Becquerel montra en effet en 1900 que la valeur de e/m pour les rayons β émis par le radium était la même que celle des rayons cathodiques. Ainsi, on faisait d'une pierre deux coups : la nature des rayons β était élucidée, et à leur tour ceux-ci contribuaient à démontrer la réalité des électrons comme particules d'électricité. Voilà donc un joli paradoxe : l'hypothèse atomiste de la matière et de l'électricité était renforcée par les études sur la radioactivité, qui révélaient... que l'atome n'est pas insécable !

Il faut remarquer dans tout ceci l'importance du groupe d'élèves que Thomson avait su attirer autour de lui. Et le mouvement ne fit que s'amplifier. De partout, les meilleurs jeunes physiciens rejoignaient le Laboratoire Cavendish, qui devint sans doute le centre mondialement le plus réputé en physique expérimentale. Une photo célèbre réunissant les chercheurs du laboratoire en 1932 montre, autour de Thomson et de son élève et successeur Rutherford, pas moins de sept autres prix Nobel en titre ou à venir...

La « découverte » de l'électron continue...

Mais l'aventure de la « découverte » de l'électron est loin de s'arrêter ici ! En effet, tout progrès réalisé dans la connaissance de ses propriétés, ainsi que toute nouvelle utilisation pratique constitue en fait un élément supplémentaire de découverte – ou d'« invention » de l'électron.

Après qu'Einstein eut proposé la théorie de la relativité en 1905 et prédit en particulier l'augmentation de la masse avec la vitesse, des mesures furent entreprises avec des électrons pour vérifier cet effet. Les expériences étaient difficiles et les résultats furent longtemps controversés, mais il apparut que, en effet, la masse de l'électron dépendait de la vitesse. De nos jours, les accélérateurs de particules accélèrent des électrons jusqu'à se rapprocher à un cent-milliardième de la vitesse de la lumière, et leur masse apparaît multipliée par plus de 100 000. La théorie de la relativité est ainsi vérifiée avec une remarquable précision.

La saga de la « découverte » de l'électron connut un nouveau rebondissement en 1925, quand on lui attribua un « spin » pouvant prendre les valeurs $+1/2$ et $-1/2$. Cet effet purement quantique, qu'on peut vaguement rapprocher d'une rotation, permettait d'expliquer le principe d'exclusion de Pauli et les détails de l'effet Zeeman.

Mais ceci n'est rien à côté de ce qui se produisit en 1927-1929. Alors que Thomson s'était battu contre les tenants de la théorie ondulatoire pour démontrer la nature corpusculaire du rayonnement cathodique, Davisson et Germer aux Etats-Unis et G.P. Thomson en Grande-Bretagne, le propre fils de « J.J. », montrèrent que l'électron se comporte ... comme une onde, en observant la diffraction d'un faisceau d'électrons sur un réseau cristallin ! Ainsi était vérifiée l'une des prédictions fondamentales de la mécanique quantique, proposée par de Broglie, la dualité onde-corpuscule.

Nouveau coup de théâtre en 1932 : on observe dans le rayonnement cosmique un « anti-électron », le positon. Il a exactement la même masse que l'électron et le même spin, mais est de charge opposée; c'est le premier représentant de l'antimatière prédite par Dirac en 1928. En 1932 également, Pauli prédit l'existence du neutrino, détecté pour la première fois en 1956, et qui n'est rien d'autre à nos yeux que le double sans charge de l'électron. En 1938, dans le rayonnement cosmique encore, on découvre une particule qui sera identifiée après la guerre comme le muon. Il est exactement semblable à l'électron à tous points de vue, sauf pour sa masse, deux cents fois plus grande : un « électron lourd » ! Et dans les années 80, on en découvre un autre, le lepton τ .

Résumons. Le corpuscule « découvert » par Thomson a une masse relativiste variable; c'est en même temps une onde; en fait, il est double (les deux valeurs du spin); on le trouve également avec une charge positive (le positon), et il peut être neutre (le neutrino); sans compter qu'il peut avoir une masse deux cents ou 3000 fois plus grande que celle mesurée par Thomson (le muon et le lepton τ). S'agit-il toujours du même « électron » ?

Et je ne parle pas ici de tous ces autres électrons que nous nous sommes peu à peu inventés : l'électron de la valence en chimie; l'électron que les centrales nucléaires propulsent dans nos habitations; l'électron qui nous permet de voir la foot à la TV (tiens, un retour du tube cathodique de Thomson, avec son champ magnétique et son champ électrique, mais en plus sophistiqué !); l'électron aussi qui servait à transporter la peinture sur les carrosseries de Renault à Vilvorde, avant que l'électron activé par les programmes informatiques de gestion ne décide la fermeture...

L'électron, toujours le même, toujours différent... Il y a cent ans, Thomson découvrait l'électron. Et nous continuons à l'inventer tous les jours !