

Genèse de l'atome de Rutherford

Joël Pouthas (pouthas@ipno.in2p3.fr)

Institut de Physique Nucléaire, CNRS/IN2P3, Université Paris-Sud 11, 91406 Orsay

Comme le souligne Gaston Bachelard dans *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, « la pensée logique a tendance à effacer sa propre histoire. Il semble en effet que les difficultés de l'invention des notions n'apparaissent plus dès qu'on peut en faire l'inventaire logique. Dans l'état actuel de la science il va quasiment de soi que l'existence du corpuscule négatif dans l'atome permette d'affirmer l'existence d'un corpuscule positif. On ajoute tout de suite, comme une raison péremptoire : Il faut bien que l'électron soit associé à un corpuscule de charge électrique égale et contraire puisque l'atome intégral est électriquement neutre. Ce raisonnement efface toute une période de l'histoire. » [1]

La proposition d'un modèle d'atome par Rutherford en 1911 s'inscrivait dans un contexte particulier que nous allons essayer d'illustrer en utilisant des extraits de documents d'époque.

L'atome de Thomson

C'est par ses travaux sur « *la conduction de l'électricité dans les gaz* » que Joseph John Thomson a marqué la physique de son temps. Son célèbre traité [2], publié à ce sujet en 1903, est un remarquable exemple de recherches expérimentales, recherches menées au Laboratoire Cavendish avec la contribution d'étudiants tels que Townsend ou Rutherford. Le principal résultat des recherches de Thomson fut la mise en évidence de l'existence du corpuscule d'électricité négative, appelé maintenant électron. C'est également l'élément fondamental de sa « *théorie corpusculaire de la matière* ». Dans l'atome neutre, l'électricité négative est donc portée par les corpuscules (électrons), mais « *la forme sous laquelle l'électricité positive se présente est aujourd'hui un sujet sur lequel nous n'avons que très peu d'information. Aucun corps électrisé positivement n'a jusqu'ici été trouvé avec une masse inférieure à celle de l'atome d'hydrogène. Dans les gaz à basse pression, tous les systèmes électrisés positivement semblent être des atomes qui, neutres dans leur état normal, sont devenus positivement chargés en perdant un corpuscule.* » ([3], p. 103.) Pour surmonter cette difficulté, Thomson considère « *un cas où l'électricité positive est distribuée d'une manière qui puisse être soumise au calcul mathématique : sous la forme d'une sphère de densité uniforme dans laquelle les corpuscules sont distribués. L'électricité positive attire les corpuscules vers le centre de la sphère tandis que leur répulsion mutuelle les en éloigne.* » ([3], pp. 103-104.)

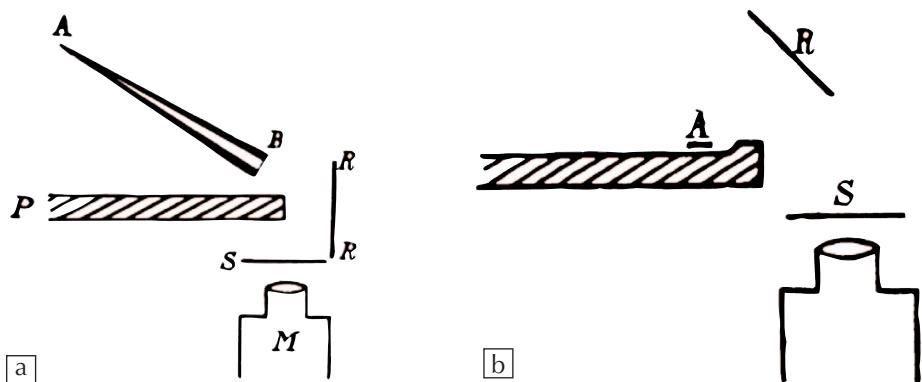
Proposé pour la première fois en 1902 par Lord Kelvin (William Thomson) [4], repris par J.J. Thomson [5] en 1903, ce modèle d'atome n'a pris véritablement son sens qu'en 1904 avec la résolution [6] de questions de stabilité (au sens de la mécanique). N'ayant pu résoudre le problème dans sa généralité, Thomson le traite analytiquement jusqu'à 100 corpuscules dans le « *cas particulier où les corpuscules sont confinés dans un plan passant par le centre de la sphère* » ([3], p. 107.)

Sa théorie corpusculaire de la matière lui permet de décrire qualitativement les propriétés électrochimiques des corps et de les mettre, pour certains éléments, en relation avec le tableau de Mendeleïev. Cette approche intéressante ne pouvait rester que très qualitative, car Thomson ne connaissait pas de manière précise le nombre d'électrons d'un atome. Après avoir supposé qu'il était très grand, diverses recherches expérimentales l'avaient conduit à penser que ce nombre était finalement faible (« *seulement quelques corpuscules dans un atome d'hydrogène* », [3], p. 162) et proportionnel au poids atomique des éléments.

Les expériences de Geiger et Marsden

À Montréal en 1906, au cours de travaux expérimentaux sur l'absorption de particules α dans la matière, Ernest Rutherford s'était peut-être déjà forgé une idée sur le rôle important que ces particules pouvaient jouer comme sonde de la matière et des atomes : « *En raison de son énorme énergie de mouvement, la particule α plonge à travers les atomes de matière sans subir beaucoup de déviation de parcours. Cependant, il y a incontestablement une légère dispersion ou déviation de parcours de la particule α lorsqu'elle traverse la matière.* » [7, 8]. Au printemps de 1909, à Manchester, Rutherford avait donné, sous la conduite de Hans Geiger, comme sujet d'études à Ernest Marsden : « *une réflexion diffuse des particules α* » [9]. Comme il le souligna lui-même quelques années plus tard, le résultat de cette recherche « *fut véritablement l'événement le plus incroyable qui soit survenu dans ma vie* » [10]. Suivons maintenant quelques brefs extraits de la méthode expérimentale et des résultats de Geiger et Marsden dans l'article transmis par Rutherford le 19 mai 1909 et lu devant la Royal Society le 17 juin [9].

« *Une petite fraction des particules α qui frappent une plaque de métal ont leurs directions changées à un tel point qu'elles peuvent émerger du côté de leur incidence.* » ([9], p. 495.)



1. Dispositifs expérimentaux de Geiger et Marsden en 1909 [9].

Geiger et Marsden se proposent d'étudier cet effet sur trois points : la nature du métal, l'épaisseur de la plaque et la proportion de particules α réfléchies.

Ils utilisent un premier dispositif (fig. 1a) avec une source gazeuse dans un tube conique (AB) et un réflecteur (RR). Une plaque en plomb (P) protège le détecteur S (écran en sulfure de zinc observé à l'œil par un microscope M suivant une méthode décrite en 1908 par Rutherford & Geiger). Il faut utiliser une « source très intense de rayons α », mais les résultats ne sont pas simples à obtenir car « le tube doit être placé très proche du réflecteur et l'angle d'incidence varie beaucoup. » ([9], p. 497.)

Pour améliorer l'étude de la proportion de particules α diffusées, Geiger et Marsden placent directement la source sur l'écran en plomb (fig. 1b). « Le dispositif expérimental représenté sur la figure était tel que les particules α venant de la plaque A frappaient le réflecteur de platine R, d'un centimètre carré de surface, sous un angle d'environ 90° . Les particules réfléchies étaient comptées en différents points de l'écran S. [...] Afin de trouver le nombre de particules réfléchies, il a été supposé qu'elles étaient distribuées uniformément sur une demi-sphère dont le centre est au milieu du réflecteur. Trois déterminations différentes ont montré qu'environ une pour 8000 des particules incidentes était réfléchie dans les conditions décrites. » ([9], p. 499.)

“Une petite fraction des particules α qui frappent une plaque de métal ont leurs directions changées à un tel point qu'elles peuvent émerger du côté de leur incidence.”

H. Geiger et E. Marsden

détaillé publié en mai dans le *Philosophical Magazine* [12]. « Il est bien connu que les particules α et β sont défléchies de leur trajectoire rectiligne dans leurs rencontres avec les atomes de matière. Cette diffusion est beaucoup plus marquée pour la particule β que pour la particule α en raison des quantités de mouvement et d'énergie beaucoup plus faibles des β . [...] Il est généralement admis que la diffusion d'un pinceau de rayons α ou β qui passe à travers une fine plaque de métal est le résultat de diffusions multiples par les atomes de matière traversée. Cependant, les observations de Geiger et Marsden sur la diffusion des particules α montrent que quelques particules α peuvent subir une déviation plus grande qu'un angle droit en une seule rencontre. » ([12], p. 238, [13].) Rutherford propose un modèle d'atome pour expliquer la diffusion à grand angle des particules α sans recourir à une diffusion multiple : « Nous allons d'abord examiner sur le plan théorique les chocs uniques [14] avec un atome de structure simple qui est capable de produire de grandes déviations d'une particule α . Nous allons ensuite comparer les déductions de cette théorie aux données expérimentales disponibles. Considérons un atome qui contient une charge $\pm Ne$ en son centre et qui est entouré d'une sphère d'électricité contenant une charge $\mp Ne$ supposée uniformément répartie sur la sphère de rayon R (e est l'unité fondamentale de charge dont nous prendrons pour valeur $4,65 \times 10^{-10}$ unités électrostatiques). Nous supposerons que pour les distances inférieures à 10^{-12} cm, la charge centrale ainsi que la charge de la particule α peuvent être concentrées en un point. On montrera que les principales déductions de la théorie sont indépendantes du choix du signe de la charge centrale. Par commodité, ce signe sera supposé positif. Dans cette phase, la question de la stabilité de l'atome n'a pas besoin d'être considérée car elle dépend de la structure fine de l'atome et du mouvement des parties chargées qui le constituent. » ([12], pp. 239-240.).

L'atome de Rutherford en 1911

Même avec les difficultés pour obtenir une détermination quantitative précise, la diffusion à grand angle des particules α a sans doute beaucoup troublé Rutherford qui n'en donna une interprétation qu'en 1911 dans une lecture devant la “Literary and Philosophical Society” de Manchester le 7 mars [11], puis dans un article plus

Dans son article, Rutherford développe des calculs de diffusion d'une charge ponctuelle, dont la formulation d'une « probabilité d'une diffusion unique suivant les angles » ([12], pp. 240-243) est connue aujourd'hui sous le nom de « diffusion Rutherford ». Il fait aussi des calculs de cinématique pour déduire la vitesse des particules α en fonction du rapport des « poids atomiques » de l'atome (197 pour l'or, 27 pour l'aluminium) et de la particule α (valeur 4). Dans sa « Comparaison de la Théorie avec les Expériences » (titre du § 6, pp. 247-252), Rutherford considère les expériences de diffusion des rayons β (Crowther, 1910), des rayons α dans la traversée d'une fine plaque de métal (Geiger, 1910) et de diffusion à grand angle de particules α de Geiger et Marsden dont il reprend le tableau de résultats de 1909 (fig. 2). Dans la dernière colonne, le nombre (z) de scintillations par minute des particules α diffusées est divisé par $A^{3/2}$ et non par A^2 comme on devrait attendre d'une « diffusion Rutherford » !

« Dans la théorie d'une diffusion unique, la fraction du nombre total de particules α diffusées à un angle donné en passant à travers une épaisseur t est proportionnelle à $n.A^2t$ en supposant que la charge centrale est proportionnelle au poids atomique A . » (« n est le nombre d'atomes par unité de volume ») [...] « Depuis que Bragg a montré que le pouvoir d'arrêt d'un atome pour une particule α est proportionnel à la racine carrée de son poids atomique, la valeur de n est proportionnelle à $1/A^{1/2}$ [...] et $z/A^{3/2}$ doit être constant. » ([12], p. 248.)

En 1911, Rutherford n'utilisait pas le terme de « noyau » mais le concept de « charge centrale concentrée en un point » ([12], p. 252) dont il ne connaît pas le signe ! [15] Le contexte très particulier dans lequel Rutherford élaborait alors son modèle d'atome peut sans doute expliquer que le concept de noyau atomique n'ait guère dépassé pendant presque deux ans les limites du laboratoire de Manchester. Lorsqu'en 1913, Geiger et Marsden écrivent un nouvel article sur « les lois de déviation des particules α à grand angle » ([16]), il ne s'agit plus pour ceux-ci de présenter des résultats expérimentaux isolés mais bien de prouver la validité du modèle d'atome de Rutherford : « Sur la suggestion du Professeur Rutherford, nous avons réalisé des expériences pour tester les principales conclusions de sa théorie. Les points suivants ont été étudiés : variation avec l'angle ; variation avec l'épaisseur du matériel diffuseur ; variation avec le poids atomique de celui-ci ;

variation avec la vitesse des particules α incidentes ; fraction des particules diffusées dans un angle défini. » ([16], p. 606.)

De Rutherford à Bohr

En 1914, pour Rutherford, l'atome de Thomson « est seulement bon pour le musée des curiosités scientifiques » [17]. Cette opinion n'était certainement pas admise par tous les physiciens, car l'article de 1911 n'avait pas suscité immédiatement un vif intérêt au sein d'une communauté scientifique où les idées de Thomson s'étaient répandues. Il faut souligner également que la seule hypothèse de l'existence d'un noyau atomique dont on savait peu de chose était loin de résoudre les difficultés d'interprétation des causes de la radioactivité, comme l'attestent les discussions du second « Conseil de Physique » Solvay à Bruxelles en octobre 1913 sur le thème de « la structure de la matière » [18]. Reprenons quelques passages extraits du rapport de Thomson sur « la constitution de l'atome » et de la discussion qu'il suscita [19], discussion qui montre que les particules identifiées en radioactivité (α et β) étaient souvent interprétées comme éléments nécessairement constitutifs de l'atome :

Thomson : « Je pense qu'en réalité lorsque deux particules α s'entrechoquent à l'intérieur d'un atome, les forces qui s'exercent entre elles ne sont pas uniquement celles qui seraient exercées entre les charges des particules en vertu des lois ordinaires de l'électrostatique. Outre ces forces-là, il y en a d'autres qui se font sentir et ce sont elles qui produisent les irrégularités caractéristiques dans les trajectoires des particules α . » ([19], p. 26.)

Rutherford : « À moins que l'on ne suppose que les atomes aient un noyau chargé de petites dimensions, il est impossible d'expliquer les faits expérimentaux de la diffusion des particules α , sans admettre que des forces d'attraction et de répulsion nouvelles et insoupçonnées, d'une nature très intense, agissent entre les atomes lorsqu'ils sont très rapprochés. Si l'on considère que la théorie du noyau conduit au même nombre d'électrons dans un atome que la diffusion des rayons X, il me paraît plus simple de supposer qu'un pareil noyau chargé a une existence réelle et qu'il est un constituant fondamental de tous les atomes. » ([19], p. 54.)

Mme Curie : « Les électrons qui ne peuvent être séparés de l'atome sans que celui-ci change de nature peuvent être nommés électrons essentiels. Il est naturel de supposer qu'ils font partie du noyau. [...] En ce qui concerne les électrons de rayonnement, il est naturel de les supposer

À moins que l'on ne suppose que les atomes aient un noyau chargé de petites dimensions, il est impossible d'expliquer les faits expérimentaux de la diffusion des particules α ...»

E. Rutherford

Metal.	Atomic weight.	z .	$z/A^{3/2}$
Lead	207	62	208
Gold	197	67	212
Platinum	195	63	232
Tin	119	34	226
Silver	108	27	211
Copper	64	14·5	225
Iron	56	10·2	250
Aluminium ...	27	3·4	243
Average			233

2. Tableau donnant le nombre total z de particules α diffusées par minute à grand angle dans la traversée d'une feuille de différents métaux de poids atomique A (mesures de Geiger et Marsden). $Z/A^{3/2}$ est constant. (Tableau de l'article original de Rutherford en 1912 [12].)

placés dans la périphérie de l'atome avec un arrangement en anneaux tel qu'il a été suggéré par Sir J.J. Thomson. On peut leur donner le nom d'électrons périphériques. » ([19], pp. 55-56.)

Au cours de cette discussion où apparaissent des hypothèses parfois contradictoires dans la recherche d'une structure d'atome permettant d'expliquer des résultats expérimentaux comme ceux des diffusions de particules α ou de rayons X, personne ne semble s'intéresser à la courte remarque que formulait alors Maurice de Broglie en se souvenant sans doute de la précédente réunion Solvay [20] : « Même pour les électrons extérieurs, on doit renoncer à la mécanique ordinaire, si l'on admet les quanta dans les phénomènes photo-électriques. » ([19], p. 56.) Et pourtant... En octobre 1913, le *Philosophical Magazine* avait déjà publié deux parties d'un article transmis à ce journal par Rutherford et intitulé « *Sur la constitution des atomes et des molécules* » [21]. Son auteur, un jeune physicien venu séjourner en Angleterre, et tout

particulièrement à Manchester, s'appelait Niels Bohr. En reprenant la structure du modèle de Rutherford et en s'interrogeant sur sa stabilité, Bohr introduisit une nouvelle approche, la quantification.

« Pour expliquer les résultats des expériences sur la diffusion des rayons α par la matière, le Professeur Rutherford a fourni une théorie de la structure des atomes. D'après cette théorie, les atomes sont constitués d'un noyau chargé positivement entouré d'un système d'électrons maintenus ensemble par les forces attractives du noyau ; la charge négative totale des électrons est égale à la charge positive du noyau. De plus, on suppose que le noyau est le siège de la principale partie de la masse de l'atome et qu'il a des dimensions extrêmement petites en comparaison de celles de la totalité de l'atome. [...] Cependant dans une tentative d'explication de la matière sur la base de ce modèle d'atome, nous rencontrons de sérieuses difficultés provenant de l'apparente instabilité du système d'électrons. [...] Le résultat de la discussion de ces questions semble être une

reconnaissance générale de l'insuffisance de l'électrodynamique classique à décrire le comportement d'un système de dimension atomique. Quelle que puisse être la modification des lois du mouvement des électrons, il semble qu'il soit nécessaire d'introduire dans les lois en question une quantité étrangère à l'électrodynamique classique : la constante de Planck ou, comme elle a été souvent appelée, le quantum élémentaire d'action. » ([21], pp. 1-2.)

Selon Thomson, l'élaboration d'un modèle d'atome pouvait constituer un guide dans l'orientation de recherches expérimentales sur les électrons et les propriétés électriques de la matière. Pour Rutherford en 1911, le recours à un nouveau modèle lui avait permis d'expliquer des résultats expérimentaux surprenants sur la diffusion à grand angle des particules α . Avec Bohr et l'interprétation des spectres de rayonnement, apparut une approche plus théorique de la structure de l'atome proposée par Rutherford. ■

Notes

- 1• G. Bachelard, *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, P.U.F. (1977), p. 142.
- 2• J.J. Thomson, *Conduction of Electricity through Gases*, Cambridge University Press (1903).
- 3• J.J. Thomson, *The corpuscular Theory of Matter*, Londres, Archibald Constable (1907).
- 4• Lord Kelvin, "Aepinus Atomized", *Phil. Mag.*, **3** (1902) 257-283.
- 5• J.J. Thomson, "The Magnetic Properties of Systems of Corpuscles describing Circular Orbits", *Phil. Mag.*, **6** (1903) 673-693.
- 6• J.J. Thomson, "On the Structure of the Atom", *Phil. Mag.*, **7** (1904) 237-265.
- 7• Les articles de Rutherford ont été réédités en trois volumes, *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, Londres, Allen and Unwin : Vol. I (New Zealand, Cambridge, Montréal) en 1962, Vol. II (Manchester) en 1963 et Vol. III (Cavendish Laboratory) en 1965.
- 8• E. Rutherford, "Retardation of the alpha-particle from Radium in passing through Matter" (1906). Ref. 7, pp. 859-869. Citation p. 867.
- 9• H. Geiger et E. Marsden, "On a Diffuse Reflection of the α -Particles", *Proc. Roy. Soc. A*, **82** (1909) 495-500.
- 10• Cité (sans référence) par N. Feather dans "Rutherford at Manchester: an epoch in physics", introduction au deuxième volume des *Collected Papers*, Ref. 7, pp. 15-33 (Citation p. 22).
- 11• E. Rutherford, "The Scattering of the α and β Rays and the Structure of the Atom". Résumé d'un article lu devant la Manchester Literary and Philosophical Society le 7 mars 1911. Réédition, Ref. 7, Vol. II, pp. 212-213.
- 12• E. Rutherford, "The Scattering of the α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom", *Phil. Mag.*, Series **6** (1911) 669-688. Réédition, Ref. 7, Vol. II, pp. 238-254.
- 13• Rutherford cite l'article de Geiger et Marsden de 1909, mais leur attribue un résultat qui n'est pas clairement présenté dans leur article : "They found, for example, that a small fraction of the incident α particles about 1 in 20 000, were turned through an average angle of 90° in passing through a layer of gold-foil about 0,00004 cm thick, which was equivalent in stopping-power of the α particle to 1,6 millimetres of air". (Ref. 12, p. 238)
- 14• Dans cet article, Rutherford considérait une diffusion unique ("single scattering") et non une diffusion multiple ("compound scattering"), dont il montre la faiblesse au sens des probabilités (§ 5, "Comparison of single and compound scattering", Ref. 12, pp. 245-247). Thomson soutenait l'hypothèse de diffusion multiple avec son modèle d'atome et en particulier pour les β . L'hypothèse de diffusion unique (importante pour l'élaboration d'un « modèle nucléaire ») fut abordée expérimentalement par Rutherford et Nuttal en 1913 : "Scattering of alpha-Particles by Gases" (Ref. 7, pp. 362-370).
- 15• E. Rutherford : "The main results of large scattering are independent of whether the central charge is positive or negative. It has not yet been found possible to settle this question of sign with certainty." Ref. 12, p. 213.
- 16• H. Geiger et E. Marsden, "The laws of Deflexion of alpha-Particles through Large Angles", *Phil. Mag.* **27** (1913) 604-623.
- 17• Citation extraite d'une lettre de Rutherford à son ami le chimiste américain B.B. Boltwood (datée du 17 mars 1914). *Rutherford and Boltwood: Letters on Radioactivity*, Yale University Press (1969) 292.
- 18• « La structure de la matière », Rapports et discussions du Conseil de Physique de l'Institut International de Physique Solvay (27-31 octobre 1913), Paris, Gauthier-Villars (1921).
- 19• J.J. Thomson, « La structure de l'atome », Ref. 18, pp. 1-44. Discussion du rapport, pp. 45-74.
- 20• « La théorie du rayonnement et les quanta. » Rapports et discussions de la réunion tenue à Bruxelles du 30 octobre au 3 novembre 1911 sous les auspices de M.E. Solvay, Paris, Gauthier-Villars, 1912. Aux réunions Solvay, Maurice de Broglie était invité comme secrétaire du Conseil.
- 21• N. Bohr, "On the Constitution of Atoms and Molecules", *Phil. Mag.* **26** (1913) 1-25. Cet article (et les deux parties complémentaires publiées la même année) a été réédité en *fac simile* par L. Rosenfeld (Copenhague, Munksgaard, 1963) et dans les *Niels Bohr - Collected Works*, Vol. 2, "Work on Atomic Physics (1912-1917)", Amsterdam, North Holland (1981).