Zeitschrift: Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Band: 114 (1991)

Artikel: L'histoire de l'atome
Autor: Rossel, Jean
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-89342

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 04.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

L'HISTOIRE DE L'ATOME

par

JEAN ROSSEL

La notion d'atome (en grec *atomos* = qu'on ne peut pas diviser) est très ancienne. Elle a probablement pris naissance dans des écoles philosophiques des Indes. Mais la notion de grain de matière fondamental, élément constitutif ultime des objets matériels a été précisée dans «*l'atomisme*» des philosophes gréco-latins fondé par Démocrite au Ve siècle avant J.-C. puis par Epicure au IIIe siècle et aussi par le poète latin Lucrèce au Ier siècle avant J.-C.

La nature se ramène à des éléments très petits, insécables répartis en un nombre fini de catégories différentes mais en nombre infini dans chaque catégorie: atomes crochus, atomes ronds, atomes lourds ou légers s'assemblent pour donner les objets que saisissent nos sens. Nous verrons que la vision scientifique actuelle présente de curieuses analogies avec ces idées anciennes.

Ces spéculations des philosophes de l'antiquité sont à caractère réductionniste comme pratiquement toute la science depuis les quatre éléments envisagés par Anaximène de Milet (Ve siècle avant J.-C.) air-eau-terre-feu. Ce n'est que récemment que des prises de position holistiques où l'on considère une globalité non réductible à ses parties se sont manifestées, par exemple dans la «systémique».

Le Moyen Age et la Renaissance ont pratiquement oublié la notion d'atome.

Au XVIIe siècle Gassendi et au XVIIIe siècle Lavoisier puis Bernouilli – dans sa théorie cinétique des gaz – ont fait usage de la notion d'atome. Mais il faut attendre le XIXe siècle pour qu'une théorie atomique (atomistique) scientifique, fondée sur l'observation et l'expérimentation voie le jour.

Une des premières manifestations en a été la «loi des proportions multiples» de Dalton (vers 1800): la mise en évidence d'associations d'éléments constitutifs (les atomes) en proportion fixe pour former les combinaisons chimiques (les molécules).

Un autre succès initial de la théorie atomique est la classification périodique des éléments chimiques dans le tableau de Mendeleev (vers 1860) pour les 92 éléments naturels allant de l'hydrogène H ($Z = 1$) à l'uranium U ($Z = 92$). Chaque élément est caractérisé par un numéro atomique Z et une masse M_A, avec des propriétés permettant de définir des groupes à caractères semblables (8 périodes).

C'est cependant la découverte vers 1900 de l'électron par J.-J. Thomson et Jean Perrin à partir des rayons cathodiques qui a permis l'établissement de la notion d'atome moderne: non plus particule élémentaire mais groupement de constituants positifs (ions) et négatifs (électrons) dans un édifice électriquement neutre.

Atome de Thomson (1910)

Le premier modèle d'atome avec des propriétés dynamiques bien définies a été proposé par Thomson en 1910: nuage sphérique d'électricité positive dans lequel se déplacent les électrons. Sur la base de la loi de Coulomb pour la force d'interaction électrique entre charges ($F = q_1q_2/r^2$) il est facile d'établir que le mouvement de l'électron dans le nuage homogène, de charge totale égale à Ze, est une oscillation harmonique (vibration périodique) avec une fréquence ν qui se calcule aisément $\nu = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{Ze^2}{mR^3}\right]^{1/2}$. En utilisant les valeurs estimées de la charge e et de la masse m de l'électron et du rayon R de l'atome résultant de l'étude cinétique des gaz on obtient une valeur d'environ 10^{14} s^{-1}. Ce résultat correspond assez bien aux fréquences de la lumière émise ou absorbée par les atomes en vertu du mouvement vibratoire de leurs électrons. Mais il est apparu très rapidement que ce modèle ne correspond pas à la réalité.

Atome de Rutherford (1911)

Un pas décisif dans l'évolution de la notion d'atome a été fait en 1911 par l'expérience de Rutherford: un faisceau de particules α (atomes d'hélium) produits par une substance radioactive naturelle est envoyé sur une feuille d'or mince. Il apparaît que la déflexion par les atomes d'or est trop grande sans l'hypothèse d'une forte concentration de masse au centre de l'atome. Ce «noyau atomique» se manifeste avec une extension de l'ordre de 10^{-13} cm ce qui est environ 10^5 fois (cent mille fois) plus petite que le rayon de l'atome. La conclusion est étonnante: l'atome et par conséquent les corps matériels sont essentiellement constitués de vide.

Le modèle d'un système planétaire composé d'un noyau central lourd et positif autour duquel tourne un cortège d'électrons négatifs de masse beaucoup plus faible est devenu l'image courante de l'atome. La masse de l'électron est 1836 fois plus faible que celle du noyau d'hydrogène (proton).

L'expérience de Rutherford inaugure l'exploration de la structure des systèmes atomiques par collision d'un faisceau incident de particules (protons, électrons, etc.). Pour que la déflexion du projectile soit suffisamment grande pour être mesurable, il faut que la longueur d'onde λ de la radiation incidente (lumière, électron, proton, etc.) soit comparable à la dimension «a» de l'objet analysé. Nous verrons plus loin qu'une particule se comporte comme une onde de longueur d'onde $\lambda \approx 1/E$. En augmentant l'énergie E du projectile on peut donc mesurer des dimensions toujours plus petites. C'est le principe du microscope électronique et cela

explique la mise en œuvre d'accélérateurs de particules toujours plus puissants pour l'exploration des structures subatomiques.

Atome de Bohr (1913)

D'après les lois classiques de l'électromagnétisme, un électron dans son mouvement accéléré sur sa trajectoire courbée devrait émettre un rayonnement et, perdant ainsi de l'énergie, tomberait sur le noyau.

La théorie des quanta appliquée par Niels Bohr à l'atome d'hydrogène signifie une brisure de la théorie classique et assure la stabilité de l'atome. La prescription ad hoc de nature quantique pour les trajectoires stables s'écrit $\oint pdq = nh$ où h est le quantum d'action de Planck et n un nombre entier. Cette condition générale (due à Sommerfeld) s'écrit dans le cas d'une trajectoire circulaire sous la forme $2\pi pR = nh$ où $pR = mvR$ est le mouvement cinétique de l'électron sur son orbite. On voit ainsi que pour une orbite stable le moment cinétique vaut un nombre entier de $h/2\pi \equiv h$. De cette condition on déduit une énergie $E_n = \frac{me^4}{2h^2n^2}$ qui caractérise la succession, pour $n = 1, 2, 3 \ldots$, des états propres de l'atome qui constituent une série discrète de niveaux d'énergie.

L'émission ou l'absorption de rayonnement lumineux n'est plus directement liée au mouvement de l'électron mais correspond à une transition entre deux états stables par la relation $h\nu = E_2 - E_1$ qui définit un quantum de lumière ou photon (Einstein).

Dans cette forme préliminaire de la mécanique quantique, la justification de la condition de Sommerfeld est fournie par le «principe de correspondance» suivant lequel il faut pour n grand retrouver le résultat classique. Les expressions dérivées par Bohr pour les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène et la condition de transition radiative ont pu rendre compte de façon quantitative des séries de raies spectrales émises par les atomes à un électron.

Atome de Broglie-Schrödinger (1925)

La mécanique quantique introduite sous forme de mécanique ondulatoire par L. de Broglie en 1925 fournit des bases plus solides pour expliquer les propriétés des atomes. A toute particule en mouvement, on associe une onde de longueur d'onde $\lambda = \frac{h}{p}$ où $p = mv$ est l'impulsion de la particule. Pour les grandes vitesses cette relation devient $\lambda \simeq \frac{1}{E}$, expression que nous avons mentionnée plus haut. Cette nature ondulatoire implique l'introduction d'une «fonction d'onde» $\psi(\vec{r}, t)$ distribuée dans tout l'espace pour fournir la «probabilité de présence» d'une particule en un point donné $\vec{r}$ au temps t. Cette fonction d'onde subit une évolution déterministe, par «l'équation de Schrödinger» à laquelle elle obéit, mais fournit une prédiction probabiliste pour le système qu'elle décrit.

L'équation de Schrödinger pour ψ est maintenant à la base de toutes les prédictions quantitatives sur les caractéristiques des atomes à un ou plusieurs électrons.

Le «dualisme onde-corpuscule» a pour conséquence une indétermination fondamentale dans la mesure des grandeurs dynamiques associées à une particule. Tout se passe comme si la lame du couteau utilisé pour disséquer la nature avait une épaisseur finie liée à la constante h, très petite mais non nulle.

Les relations d'indétermination de Heisenberg $\Delta p \Delta q \simeq h$ et $\Delta t \Delta E \simeq h$ expriment mathématiquement cette limitation.

Ainsi si la position q est bien connue, l'imprécision $\Delta q = 0$ et il s'ensuit que $\Delta p \to \infty$ donc que la connaissance de p (c'est-à-dire la vitesse) nous échappe complètement. Pour l'électron dans l'atome, la notion de trajectoire est caduque. L'électron est réparti autour du noyau suivant un nuage de probabilité défini par la fonction d'onde ψ. A chaque état d'énergie correspond une distribution de probabilité $|\psi|^2$ qui représente une onde stationnaire.

Dans un schéma simplifié cette condition correspond à un nombre entier de longueurs d'onde le long d'une «trajectoire» supposée circulaire de rayon R. Ceci s'écrit:

$$2\pi R = n\lambda = n\,\frac{h}{p} \qquad \text{soit} \qquad pR = n\,\frac{h}{2\pi} = nh.$$

On retrouve de façon naturelle la condition de quantification fournie par la prescription de Sommerfeld.

Le dualisme onde-corpuscule caractéristique de la mécanique quantique est un cas particulier du principe de complémentarité: deux aspects contradictoires ne sont pas nécessairement antinomiques mais complémentaires. Ce principe a une résonance philosophique qui a été exploitée par Bohr et d'autres épistémologues.

Atomes de Pauli (1925-1930)

W. Pauli a formulé un principe d'exclusion qui s'applique aux électrons d'un atome comme aux autres particules ayant un moment cinétique de pivotement ou «spin» valant un demi-entier de h, par exemple 1/2. Cette caractéristique régit leur comportement statistique d'ensemble et leur vaut le nom de «fermions» (d'après la loi statistique de Fermi-Dirac). D'après le principe d'exclusion, deux fermions — deux électrons — ne peuvent occuper simultanément le même état quantique. Dans un atome de plusieurs électrons, un niveau d'énergie E_n ne peut contenir plus de $2n^2$ électrons. Les électrons vont donc se répartir autour du noyau en couches successives d'énergie et d'extension croissantes. Ils ne pourront pas se condenser dans le niveau le plus bas. Cette condition est à la base du «principe d'édification» des atomes de Z croissant et fournit une explication au tableau périodique de Mendeleev.

Sans le principe d'exclusion de Pauli la matière s'écroulerait sur elle-même.

Je m'en voudrais de ne pas récapituler ici les grands noms parmi les créateurs de la théorie atomique moderne: Rutherford, Bohr, Sommerfeld, de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Pauli, Dirac.

Structure du noyau (dès 1920)

Dès les années 1920 des réactions nucléaires transformant des noyaux atomiques en noyaux d'autres atomes et faisant apparaître des corpuscules constitutives ont été provoquées en laboratoire. C'est ainsi que la structure du noyau a pu être déterminée après la découverte du neutron (Chadwick 1932) comme composée de protons électriquement positifs et de neutrons électriquement neutres.

Ces «nucléons» sont liés dans le noyau par l'interaction nucléaire forte (source de l'énergie nucléaire) qui surcompense la répulsion électrique agissant entre les protons. Un noyau donné comporte $A = Z + N$ nucléons et dans l'atome neutre est entouré de Z électrons.

Certains noyaux ne sont pas stables et se désintègrent par radioactivité. C'est le cas d'un neutron isolé qui se transforme en proton p avec émission d'un électron (particule β) et d'un «neutrino» suivant le schéma

$$n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}_e$$

ou pour un noyau radioactif β plus lourd:

$$Z \rightarrow Z + 1 + \beta^- + \bar{\nu}_e$$

L'existence du neutrino (particule sans charge et pratiquement sans masse) avait déjà été postulée par Pauli pour satisfaire le principe de conservation de l'énergie dans l'émission β où le spectre d'énergie du β est continu et non pas discret comme dans une réaction à deux corps.

Dans notre histoire de l'atome, les années 1930-1935 représentent une étape importante puisque la physique, dans son effort réductionniste ramenait la matière à trois particules constitutives fondamentales: le proton, le neutron et l'électron et à une particule quasiment insaisissable le neutrino. N'oublions pas l'existence du photon, grain de lumière qui n'est pas de la matière proprement dite mais de l'énergie libre.

Il faut encore ajouter que Dirac (1930) avait déjà élaboré une théorie de l'électron satisfaisant la relativité d'Einstein et fait apparaître le «positron» ou antiparticule de l'électron. C'était la première manifestation de l'antimatière dont l'existence a été confirmée tout au long des années suivantes. Remarquons que dans l'émission β^- c'est une particule d'antimatière $\bar{\nu}_e$ qui prend naissance.

Structure du nucléon (1960-1965)

Dans leur quête d'un élément constitutif ultime, les physiciens nucléaires ont analysé la structure des nucléons au moyen d'accélérateurs d'énergie croissante. Dans des expériences de diffusion inélastique d'électrons de grande énergie par les protons et les neutrons, en analogie avec l'expérience de Rutherford ils ont mis en évidence des grains quasi ponctuels à l'intérieur des nucléons. Ces «partons» ont pu être rapidement identifiés comme étant les «quarks» déjà proposés (Gell-Man 1964) pour expliquer les structures subatomiques.

On distingue d'abord deux «saveurs» particulières de quarks: les quarks «up» u et les quarks «down» d.

Ces quarks de spin 1/2 comme les nucléons ont des charges fractionnaires de $\frac{2}{3}e$ et $-\frac{1}{3}e$ respectivement parce que c'est en groupe de trois qu'ils constituent les nucléons

$$(uud) \text{ soit } Q = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1 \text{ pour le proton}$$

$$(udd) \text{ soit } Q = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 1 \text{ pour le neutron}$$

Malgré tous les efforts, les quarks n'ont jamais pu être mis en évidence isolément; ils restent toujours confinés dans les nucléons et autres particules analogues (baryons) produites artificiellement aux hautes énergies et en général instables. Pour expliquer les propriétés des particules nouvelles (baryons et mésons) créées au moyen des accélérateurs, il a fallu, après de nombreuses mesures et minutieux recoupements introduire plusieurs familles de quarks se distinguant par leur «saveur».

Certaines particules baryoniques produites par les accélérateurs sont composées de trois quarks identiques et dans le même état quantique, par exemple $\Delta^{++} \equiv (uuu)$; ceci violerait le principe d'exclusion. Cette difficulté a été levée en introduisant une caractéristique nouvelle pour les distinguer qu'on a appelée «couleur». Ainsi il faut que chaque quark existe en trois états de couleur: le rouge, le vert et le bleu.

Aussi importantes que les particules elles-mêmes sont les lois de forces qui produisent leurs interactions mutuelles et conditionnent leur dynamique. Actuellement on distingue 4 lois de forces:

force de gravitation (attraction entre les masses);

force électromagnétique (agissant entre particule chargées électriquement);

force nucléaire faible (responsable de la radioactivité β et de l'interaction des neutrinos);

force nucléaire forte (soudant les nucléons dans les noyaux).

Le souhait des physiciens est de pouvoir les unifier. Un premier pas a été accompli en les interprétant toutes comme dues à l'échange, entre deux particules en interaction, d'un «boson» (corpuscule de spin entier) porteur de force. Un second progrès a été réalisé par l'unification, dans une «théorie électro-faible» de la seconde et de la troisième loi de force (Glashow-Weinberg-Salam, Prix Nobel 1979). La découverte en 1983 des bosons intermédiaires pour l'interaction faible a confirmé qu'ils étaient les seuls à avoir une masse non nulle et même considérable (env. 100 fois la masse du proton) et existaient en trois exemplaires W^+ W^- et Z^0 (Prix Nobel 1984 pour Rubbia et van der Meer).

L'interaction faible est caractéristique des «leptons» particules analogues à l'électron et son neutrino. En général les leptons ont une masse petite par rapport aux baryons.

Le boson d'échange pour la force électromagnétique est évidemment le photon γ de spin 1 et $m = 0$.

La situation est plus compliquée pour l'interaction forte ; les quarks étant colorés, les bosons d'échange les «gluons» (de masse = 0 et spin 1) sont doués de mélange de couleurs et existent en 8 exemplaires. La couleur, en fait, apparaît comme une «charge» d'interaction forte. C'est un concept important car l'expérience montre que toutes les particules soumises à l'interaction forte, les «hadrons» sont blancs (ou singulets de couleur) ce qui peut expliquer le confinement obligé des quarks dans les hadrons.

D'autres hadrons blancs sont les «mésons» intermédiaires entre les leptons et les baryons, particules instables présentes dans les rayons cosmiques et produites dans les collisions à grande énergie et qu'on décrit par la combinaison d'un quark q avec son antiquark $\bar{q}$ dont l'anticouleur compense la couleur du quark.

Pour compléter cette liste de bosons porteurs de force, il faut mentionner le «graviton» (de charge nulle et de spin = 2) boson d'échange hypothétique pour l'interaction gravitationnelle.

Un autre boson hypothétique résulte d'une astuce mathématique (brisure spontanée de symétrie) nécessaire pour expliquer la masse de $W^{\pm}$ et Z^0. Ce boson scalaire, c'est-à-dire de spin = 0 et de masse probablement grande est appelé particule de Higgs et fait l'objet de recherches actives dans les grands centres dotés d'accélérateurs géants.

Si on fait le compte global on constate qu'il devrait exister 14 bosons porteurs de force.

Le modèle standard (1980-)

La description que la physique actuelle donne du monde subatomique, des particules élémentaires — les atomes d'aujourd'hui — et de leurs interactions se résume dans le «modèle standard» dont le tableau ci-dessous donne une idée succincte :

	Q				
Fermions (spin 1/2)	$\frac{2}{3}$	u	c	t	6 saveurs de *quarks* (hadrons) avec chacun 3 couleurs r, v, b (Interaction forte)
3 générations	$-\frac{1}{3}$	d	s	b	
Particules constitutives de la matière	-1	e	μ	τ	3 doublets de *leptons* (avec neutrino associé) (Interaction faible)
+ antiparticules	0	ν_e	ν_μ	ν_τ	
Bosons (spin entier) porteurs de force	γ $W^{\pm}$ Z^0 Higgs		8 gluons		Graviton
	Interaction Electrofaible		Interaction forte		Gravitation

u = up, d = down, c = charm, s = strange, t = top, b = bottom, e = électron, μ = muon, τ = lepton tau.

Si on a la curiosité de dénombrer le nombre total de particules élémentaires on compte 48 fermions et antifermions et 14 bosons soit un total de 62. Il faut remarquer que 4 de ces particules n'ont pas encore été mises en évidence expérimentalement: le quark «top» t, le neutrino associé au lepton τ, ν_τ, le boson de Higgs et le graviton.

Au moyen des quarks, il est possible d'expliquer la structure de tous les hadrons connus, stables ou instables

Baryons qqq: p, n, Λ, Σ, etc.

Mésons $q\bar{q}$: $\pi^{\pm}\pi^{0}$ K, etc.

Donnons deux exemples d'instabilité d'hadrons:

$$\Lambda \rightarrow p + \pi$$

$$\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu, \text{ etc.}$$

Le modèle standard représente une étape importante de notre connaissance des particules élémentaires et de leur dynamique; il n'a pas été contredit jusqu'ici (1991).

En particulier le nombre de 3 générations de quarks et de leptons qui peut paraître arbitraire a bien été confirmé récemment.

Cependant la physique ne saurait se satisfaire d'un modèle qui contient encore beaucoup de paramètres ouverts (par exemple la masse des particules). C'est pourquoi la physique au-delà du modèle standard est activement explorée et des efforts d'unification des lois de force sont en cours.

Quoi qu'il en soit, pour que la physique corpusculaire ne devienne pas une fuite en avant, imposant des accélérateurs toujours plus puissants et une division toujours plus fine de la matière, il faut espérer que le modèle standard, malgré ses insuffisances reconnues, représente une étape de longue durée dans l'évolution de la notion d'atome.

Note: Des mesures récentes, très précises du spectre β de certains radioisotopes (H3, C14, S35) semblent indiquer l'existence d'un neutrino massif (17 keV) insoupçonné jusqu'ici. Cela signifierait l'émergence d'une «nouvelle physique» au-delà du modèle standard.

Adresse de l'auteur: Institut de physique, Université de Neuchâtel, 1, rue A.-L.-Breguet, CH-2000 Neuchâtel, Suisse.