

1

Une brève histoire des débuts de la physique quantique



De gauche à droite et de haut en bas : Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr,
Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger,
Paul Dirac, Max Born et Wolfgang Pauli.

La physique atomique à l'orée du XX^e siècle

Imagines par Leucippe¹ et Démocrite² au V^e siècle av. J.-C. pour répondre à des nécessités purement métaphysiques, les atomes acquièrent le statut d'hypothèse de plus en plus sérieuse au fil du XIX^e siècle. A l'aube du siècle suivant, on a déjà accumulé beaucoup d'informations sur leurs propriétés sans pourtant être en mesure de les observer. On en connaît la masse et le nombre d'électrons. On a pu en évaluer la taille, mais surtout, on a mesuré avec une grande précision la longueur d'onde de la lumière qu'ils émettent. L'art de mesurer le spectre lumineux des atomes se développe au XIX^e siècle au point de devenir une branche à part entière de la physique : la *spectroscopie*.

Les atomes de Leucippe et de Démocrite

Leucippe et Démocrite inventèrent l'atome pour répondre à une question d'ordre purement métaphysique. Parménide d'Elée, en étudiant la sémantique de l'Être, en avait affirmé l'unité et l'immuabilité. Sa philosophie pourrait se résumer ainsi : « en dehors de l'être ne reste que le non-être. Le néant et ce qui est, demeurent ». Ces affirmations posaient alors l'épineuse question du mouvement. En effet, le mouvement étant une manifestation du changement, comment l'être, par essence immuable, pouvait-il être sujet au changement ? Face à cette difficulté métaphysique, Leucippe et Démocrite proposèrent de diviser l'être en entités très petites et immuables : les atomes. L'immuabilité et l'unité de l'être étaient alors transférées du corps, de l'objet macroscopique aux atomes. Ainsi, l'être des atomes conservait-il son caractère immuable tout en permettant aux corps de se déplacer. Mais cette conception se heurtait à une difficulté qui fut mise en évidence par Zénon sous la forme d'une aporie (aporie de Zénon). Zénon avait montré que la division d'une quantité en parties plus petites n'avait pas de limite. La répétition à l'infini de cette opération menait inévitablement au rien ce qui conduisait par conséquent à la conclusion que les corps n'étaient composés de rien. Afin d'éviter le piège de cette aporie, Leucippe et Démocrite imposèrent à leurs minuscules entités d'être insécables, d'où le nom d'atome !

On le voit, les raisons qui ont motivé Leucippe et Démocrite à concevoir les atomes sont très éloignées de celles qui ont conduit la Science à la physique atomique. Cependant, l'idée d'atome traversa les millénaires et parvint aux hommes de science du XVII^e siècle édulcorée de sa vocation originelle. Elle servit indéniablement de support intellectuel au concept alors vague de discontinuité de la matière. Car le mouvement de l'air, les tourbillons et les courants dans l'eau, les réactions chimiques par lesquelles des

¹ Philosophe grec, environ 460-370 av. J.-C.

² Philosophe grec, environ 460-370 av. J.-C.

éléments de qualités diverses se combinaient pour constituer un nouvel élément, tous ces phénomènes étaient autant de révélateurs d'une nature de la matière essentiellement discontinue qui s'accommodait parfaitement avec la vision mécaniste du monde que renvoyait la mécanique newtonienne.

L'aventure de la spectroscopie commence deux siècles plus tôt avec Isaac Newton. En faisant passer un rayon lumineux à travers un prisme, ce dernier observe que la lumière se décompose selon les couleurs de l'arc-en-ciel (schématiquement : rouge, orange, jaune, vert, bleu, violet, indigo). Cette décomposition de la lumière en ses composantes de couleur s'appelle le *spectre lumineux*. On réalise au tout début du XIX^e siècle (découverte de Thomas Young¹) qu'à chaque couleur correspond une longueur d'onde de la lumière ; la longueur d'onde de la lumière rouge étant plus grande que celle de l'indigo. Le spectre de la lumière s'interprète donc comme la décomposition d'un faisceau lumineux selon la longueur d'onde des ondes lumineuses qui le composent. On remarque alors que les éléments chimiques n'émettent pas de la lumière sur l'ensemble du spectre lumineux mais seulement à des fréquences bien précises (voir la Figure 2).

Longueur d'onde et fréquence des ondes

La forme la plus simple d'une onde peut être représentée comme des vagues sur la surface de l'eau. Une telle courbe s'appelle une *sinusoïde*. Une onde ayant cette forme porte le nom d'*onde sinusoïdale*. La longueur d'onde est la distance entre deux crêtes successives. La fréquence de l'onde est le nombre de fois que la surface de l'eau monte et descend en une seconde, ou encore, ce qui revient au même, le nombre de crêtes qui passent devant un observateur immobile en une seconde. On appelle période le temps mis par une onde sinusoïdale pour osciller une fois. La période est très précisément l'inverse de la fréquence.



Si l'on note par λ la longueur d'onde, ν (prononcer « nu ») la fréquence et T la période de l'onde, l'équation d'une onde sinusoïdale linéaire (se propageant le long d'une corde par exemple) s'écrit alors :

$$\psi(x, t) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} + 2\pi \nu t + \varphi\right), \text{ ou encore } \psi(x, t) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} + \frac{2\pi t}{T} + \varphi\right).$$

¹ Thomas Young, physicien, médecin et égyptologue britannique, 1773-1829.

A peu près au même moment, William Wollaston¹ découvre, en analysant le spectre solaire, que certaines fréquences y sont manquantes, laissant une raie sombre à la place. Si ces fréquences sont absentes du rayonnement solaire c'est qu'elles sont absorbées par l'enveloppe de gaz qui entoure le Soleil : la *couronne solaire*. Quelques années plus tard, en 1814, Joseph Fraunhofer² fait le rapprochement entre certaines raies d'absorption observées dans le spectre solaire et des raies d'émission d'éléments chimiques connus. Il comprend alors que les éléments chimiques absorbent les mêmes fréquences que celles qu'ils émettent. C'est Gustav Kirchhoff³ qui fera la synthèse de ces découvertes. Avec Robert Bunsen⁴, il établit les lois du rayonnement des corps qui portent son nom : *les lois de Kirchhoff*. Dans le langage d'aujourd'hui, ces lois s'expriment ainsi :

- Les atomes émettent de la lumière à des fréquences précises, qui varient d'un élément chimique à un autre.
- Les atomes émettent les ondes lumineuses aux mêmes fréquences qu'ils les absorbent et réciproquement.
- Les pouvoirs absorbant et émissif d'un atome sont identiques, ce qui signifie que les atomes émettent autant de lumière qu'ils en absorbent.

¹ William Wollaston, philosophe britannique, 1659-1724.

² Joseph von Fraunhofer, physicien allemand, 1787-1826.

³ Gustav Kirchhoff, physicien allemand, 1824-1887.

⁴ Robert Bunsen, physicien allemand, 1811-1899.

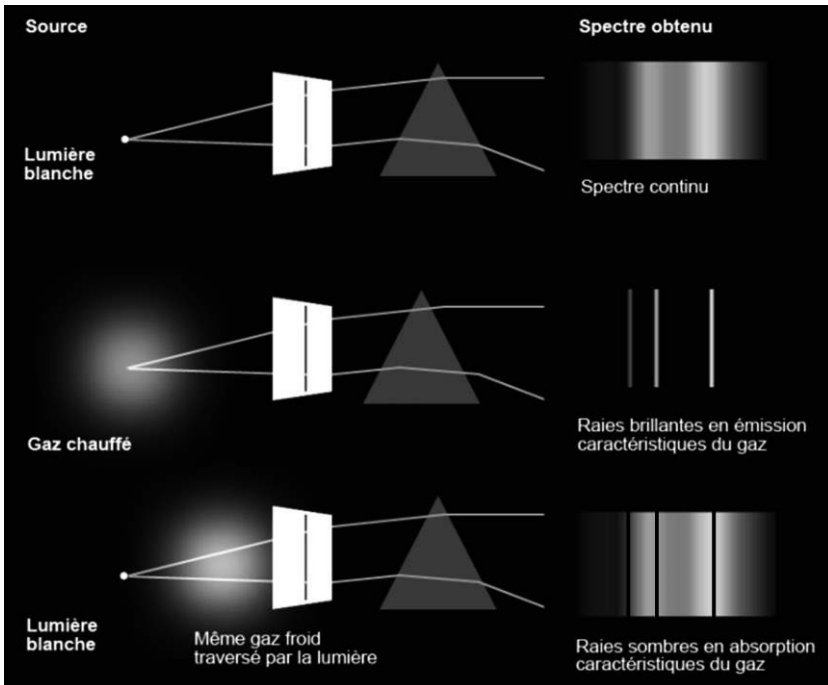


Figure 1 : Raies d'émission et d'absorption d'un gaz. Un gaz chauffé émet de la lumière à des fréquences précises. Ce même gaz froid traversé par une lumière blanche absorbe la lumière aux mêmes fréquences que les raies d'émission, laissant des raies sombres dans le spectre.

Durant tout le XIX^e siècle, la spectroscopie fait des progrès considérables. Les fréquences des raies d'émission (ou d'absorption) des éléments chimiques et leur largeur¹ sont mesurées avec une précision grandissante au point que celles-ci deviennent des marqueurs fiables des éléments permettant de les identifier avec certitude. C'est en analysant les spectres d'émission du Soleil et des étoiles que l'on a pu connaître leur composition chimique. Mais si les spectres des atomes sont parfaitement connus, la raison pour laquelle ils sont discontinus (c'est-à-dire constitués de raies à des fréquences précises) plutôt que continus (c'est-à-dire couvrant toutes les gammes de fréquences) reste encore à cette époque un mystère total. Les lois de Kirchhoff, pourtant très simples, ne trouvent pas d'explication avec l'arsenal théorique du moment.

¹ La largeur d'une raie d'émission correspond à un intervalle de longueurs d'onde ou de fréquences. En réalité, un atome n'émet (ou n'absorbe) pas de la lumière à une fréquence très précise mais dans un intervalle de fréquences plus ou moins large. Cette largeur est la conséquence de phénomènes quantiques.

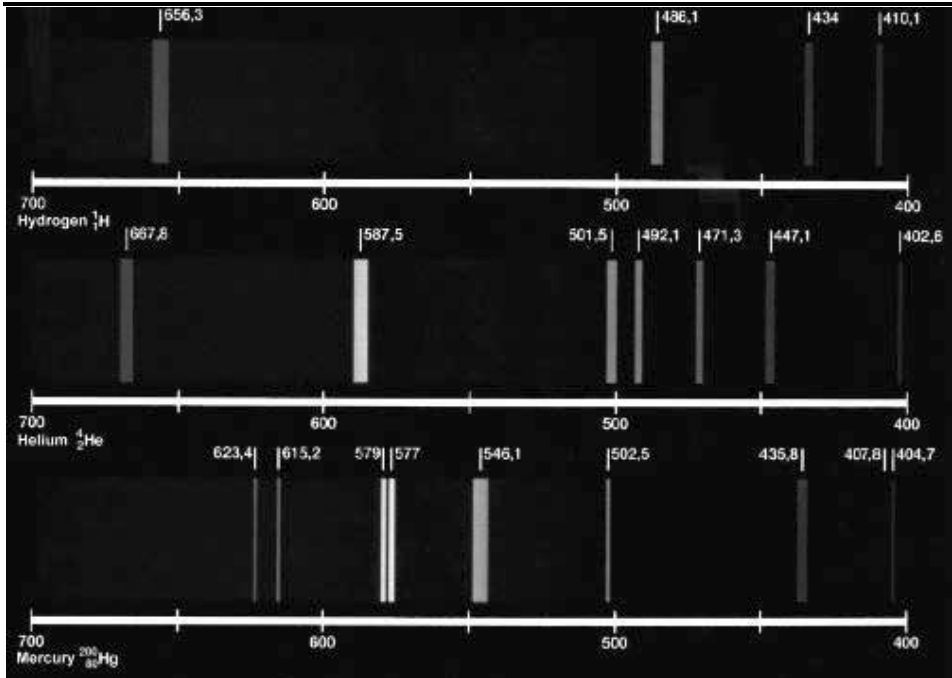


Figure 2 : De haut en bas, spectres d'émission des atomes d'hydrogène, d'hélium et, de mercure. Les nombres indiquent la longueur d'onde en nanomètres ($1 \text{ nm} = 10^{-12} \text{ m}$).

On sait depuis les travaux de Maxwell¹ – le fondateur de la théorie de l'électromagnétisme – que la lumière est en fait une onde électromagnétique. Maxwell prédit l'existence de ces ondes en 1865. Elles ne seront mises en évidence qu'en 1887 par Heinrich Hertz². En 1864, Maxwell réussit l'extraordinaire prouesse de synthétiser l'ensemble des phénomènes électriques et magnétiques en quatre équations³. Ces quatre équations nous disent les choses suivantes :

- **Première équation de Maxwell** : Il existe des charges électriques et celles-ci engendrent un champ électrique.
- **Deuxième équation de Maxwell** : Il n'existe pas de charge magnétique⁴.

¹ James Clerk Maxwell, physicien britannique, 1831-1879.

² Heinrich Rudolf Hertz, physicien allemand, 1857-1894.

³ En fait, à l'époque de Maxwell, elles étaient au nombre de 6. Un travail de simplification les ramena au nombre de 4.

⁴ La théorie SUSY (pour SuperSYmétrie) prédit l'existence de charges magnétiques appelées *monopoles magnétiques*. Cependant, cette théorie est encore très spéculative et aucun monopole magnétique n'a été observé à ce jour.

- **Troisième équation de Maxwell** : Un champ magnétique qui varie dans le temps engendre un champ électrique.
- **Quatrième équation de Maxwell** : Des charges électriques en mouvement (ce que l'on appelle un courant électrique), de même qu'un champ électrique qui varie dans le temps engendrent un champ magnétique.

Les deux dernières équations, lorsqu'on les combine donnent naissance aux ondes électromagnétiques. Nous allons voir comment. Imaginez que l'on fasse varier un champ électrique localement, dans un très petit volume, en faisant osciller un électron par exemple. En vertu de la quatrième équation, cette variation va engendrer un champ magnétique dans le voisinage de ce petit volume (un électron en mouvement est assimilable à un courant électrique). Si la variation du champ électrique n'est pas linéaire, le champ magnétique engendré ne sera pas constant ; il va lui aussi varier. Cette variation va à son tour engendrer dans le voisinage un champ électrique variable qui à son tour va engendrer un champ magnétique variable et ainsi de suite et de proche en proche. On a créé une perturbation des champs électrique et magnétique qui se propage... à la vitesse de la lumière, soit environ 300 000 km/s. Nous venons d'assister à la naissance d'une onde électromagnétique !

Une onde électromagnétique est une perturbation électrique et magnétique qui se propage dans l'espace. Les champs électrique et magnétique ont la propriété d'être toujours perpendiculaires l'un à l'autre. La figure qui suit donne une représentation d'une onde électromagnétique.

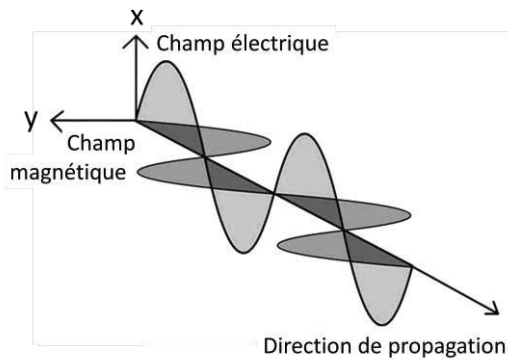


Figure 3 : Modélisation d'une onde électromagnétique sinusoïdale.

Les ondes électromagnétiques couvrent un large spectre, des ondes radio Grandes Ondes, jusqu'aux rayons X et rayons gamma, en passant par les micro-ondes et la

lumière visible. Tous ces rayonnements sont de nature électromagnétique et mettent en œuvre le même phénomène. Ils ne se distinguent que par leur fréquence.

On connaît les électrons¹ depuis le XIX^e siècle. D'abord imaginés en 1838 par Laming² pour tenter de rendre compte des propriétés chimiques des éléments, les électrons sont mis en évidence par J.J. Thomson³ en 1897 à l'aide de tubes cathodiques. Bien que les atomes ne soient encore qu'une hypothèse, on suspecte fortement que les électrons en soient l'un de leurs composants. L'expérience de Rutherford⁴ vient confirmer cette hypothèse en 1909.

Rutherford place, sous vide, une fine feuille d'or avec des particules alpha⁵. Il remarque alors que les trajectoires d'une faible proportion de ces particules sont déviées (environ 0,01 % des particules alpha incidentes sont ainsi déviées). Les particules alpha portant deux charges électriques positives, leur trajectoire ne peut être déviée que par d'autres charges électriques, soit positives, soit négatives. Or, J.J. Thomson a montré que les charges négatives sont portées par les électrons, particules plus de 8 000 fois plus légères que les particules alpha. Il est donc peu probable que les particules alpha soient repoussées par des électrons. La déviation observée résulte donc d'une interaction avec des charges positives. L'analyse détaillée des résultats de son expérience conforte Rutherford dans cette hypothèse. Il en tire deux conclusions majeures :

1. la matière est principalement constituée de vide puisque l'écrasante majorité (99,99 %) des particules alpha traverse la feuille d'or sans rencontrer le moindre obstacle,
2. les charges électriques positives dans un atome sont localisées dans un très faible volume.

¹ Le mot *électron* (ἤλεκτρον) signifie en grec ancien, ambre. Les phénomènes électrostatiques ont été découverts par électrisation de l'ambre.

² Richard Laming, industriel et philosophe britannique, 1798-1879.

³ Joseph John Thomson, physicien britannique, 1856-1940. Prix Nobel de physique en 1906.

⁴ Ernest Rutherford, physicien néo-zélandais, 1871-1937, prix Nobel de chimie en 1908.

⁵ Les particules alpha sont des particules émises par certains corps radioactifs. Ernest Rutherford montra en 1908 qu'elles étaient en fait des noyaux d'hélium, c'est-à-dire un objet composite constitué de deux protons et de deux neutrons.