

# Chapitre I. Naissance et développement de la physique quantique

## 1. Naissance de la physique quantique

### 1.1. Première période

#### 1.1.1. La crise des théories classiques (1881-1911)

Pour Bohr, la première rupture avec les théories classiques est intervenue avec la découverte de l'électron :

*La révolution dans notre conception des processus atomiques a été provoquée par la création de la théorie électrique de la matière, pour laquelle la découverte du quantum d'électricité élémentaire a été fondamentale.<sup>1</sup>*

Bohr ajoute :

*Comme on le sait, l'origine de la physique atomique moderne a fait la reconnaissance de la nature atomique de l'électricité elle-même.<sup>2</sup>*

La première étape a été, selon lui « de reconnaître que l'électron est un constituant commun de tous les corps »<sup>3</sup>. En ce sens, on peut la situer soit en 1881, quand Helmholtz introduit la notion d'atome de l'électricité, soit en 1897, quand J. J. Thomson mesure le rapport

---

<sup>1</sup> Bohr N., « Chimestery and the quantum theory of atomic costitution », *Journal of the Chemical Society*, 1932, 349-384. In BCW 6, 371-410, p. 374.

<sup>2</sup> Bohr N., « Biology and atomic physics », *Proceedings of the Galvani Congress*, Bologne, 1937, *Nuovo Cimento* 15, 1937, p. 429-438, trad. franç. « Biologie et physique atomique », in Bohr N., *Physique atomique et connaissance humaine (Pa)*, Paris, Gallimard, p. 165-179, p. 170.

<sup>3</sup> Bohr N., « Discussion with Einstein on epistemological problems of atomic physics », in *Albert Einstein Philosopher-Scientist*, P. A. Schilpp, éd. 1949, trad. franç. « Discussion avec Einstein sur des problèmes épistémologiques de la physique atomique » in *Pa*, p. 254.

$e/m$  dans les rayons cathodiques, le détermine comme un invariant numérique grâce à la convergence d'expériences faites selon des méthodes différentes, et propose de le considérer comme un nouvel état de la matière. Cette rupture est décisive pour Bohr parce qu'elle représente l'entrée dans une « nouvelle région de l'expérience » et que toute la philosophie de Bohr, comme celle de Heisenberg, est construite autour de l'idée que nos différents langages procèdent de l'évolution de la partition des régions de notre expérience.

En effet, la naissance de l'électron dans les années 1880-1890, provoque à la fois une « crise des théories classiques » et l'apparition d'un « problème nouveau », celui de la constitution électrique de la matière (d'un modèle de l'atome).

*Crise des théories classiques* : l'interprétation de l'électron pose aux environs de 1900 les problèmes de l'extension des théories électromagnétiques (continues) au niveau microphysique et de l'inversion du rapport hiérarchique entre la mécanique et l'électromagnétisme (au profit de ce dernier). La difficulté est de savoir comment concevoir si la notion de charge électrique discrète est une source de déséquilibres en chaîne dans la physique entre 1880 et 1910 environ, et si cela conduit graduellement à abandonner la croyance dans l'universalité d'un fondement mécanique des phénomènes physiques, comme le suggère Lorentz. En 1904, Poincaré décrit la physique mathématique comme un champ de ruines et parle de débâcle générale. La naissance de l'épistémologie à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, chez Helmholtz, Hertz, Mach, Poincaré, etc. peut être considérée comme une tentative pour comprendre ce développement de manière historique et critique. En tout état de cause, au début du XX<sup>e</sup> siècle, l'idée communément admise par les physiciens qui, selon le mot de Sommerfeld, ont « moins de quarante ans » est que, pour résoudre la crise, il faut construire une représentation électromagnétique générale des phénomènes, dans laquelle les seules réalités physiques seraient l'éther et les particules chargées<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Sommerfeld A., « Zur theorie der Balmerschen Serie », *Münchener Berichte*, 1915, 425-458. L'article présente l'essentiel de la théorie de Bohr pour l'atome d'hydrogène. Formation des « conditions quantiques » ; Sommerfeld A., « philosophie und physik », *Naturwissenschaftl.* I, 1948, p. 97-100 ; réédité in

*Apparition d'un nouveau problème* : si l'électron est un constituant élémentaire de toute matière, il faut disposer d'une théorie du mouvement des électrons dans les atomes qui puisse rendre compte des propriétés physiques et chimiques de ces derniers. Selon Bohr, « la tâche que cette image de l'atome imposait à la science de la nature [était] de rendre compte des propriétés physiques et chimiques des éléments à partir d'un seul nombre, le nombre des électrons dans l'atome »<sup>1</sup>. Or, il est presque immédiatement clair que les théories classiques ne permettent de construire que des modèles partiels et inadéquats. La difficulté fondamentale est de comprendre la stabilité mécanique et radiative des atomes dans les collisions et dans les réactions de rayonnement et même le modèle bi-dimensionnel de Thomson, en 1904, ne s'en tire que de façon artificielle, en introduisant une force répulsive supplémentaire en  $1/r^3$  entre les électrons. L'histoire des modèles atomiques, qui s'étend de 1901 (date à laquelle J. Perrin propose un premier modèle planétaire de l'atome) à 1923 (date à laquelle Pauli propose de se passer résolument de tous les modèles) incarne l'abandon graduel des principes de la physique classique et la rupture avec le mécanisme au nom même de l'atomisme. Comme l'écrit Cassirer, dans son *Determinism and Indeterminism*<sup>2</sup> : les modèles atomiques sont comme un miroir qui réfléchirait de nouvelles données de l'observation et le progrès des idées théoriques.

Le premier congrès de Solvay a révélé l'étendue de la crise due à ces accumulations de « problèmes de discontinuité ». Dans son discours d'ouverture, Lorentz annonce que les questions qui seront traitées (les conséquences de l'idée de quanta d'énergie) touchent aux principes mêmes de la mécanique et il parle d'impasse. Le rapport de Planck commence avec le constat de l'échec du cadre de la dynamique classique. Einstein suggère, de son côté, que la dis-

---

Sommerfeld A., *Gesammelte Schriften*, Vieweg, Braunschweig, 1968, vol. IV., p. 640-643.

<sup>1</sup> Bohr N., « Grundlaget for den moderne Atomforskning », *Fysisk Tidsskrift*, 23, 1925, 10-17. Conférence donnée le 22 octobre 1924 à l'occasion de la réception de la Médaille Ersted. Trad. anglaise sous le titre « The foundations of modern atomic research » in *BCW* 5, 135-142.

<sup>2</sup> Cassirer E., *Determinism and Indeterminism in Modern Physics : Historical and Systemic Studies of the Problem of Causality*, New Haven, Yale University Press, 1956, p. 148.

continuité existe vraiment dans la nature. Brillouin, quant à lui, conclut qu'il faudra bouleverser les fondements mêmes de l'électromagnétisme et de la mécanique classique. Enfin, Poincaré pense que les nouvelles recherches mettent en question non seulement les principes fondamentaux de la mécanique, mais également l'idée même de loi naturelle.

### 1.1.2. *Le quantum d'action*

La physique classique qui s'est développée au XIX<sup>e</sup> siècle avait pour but l'étude des phénomènes à notre échelle, que l'on peut atteindre d'une manière plus ou moins directe par les sens, les appareils ne font que transformer en résultats précis d'expériences quantitatives des notions qui sans eux demeureraient vagues et qualitatives.

Les traits essentiels de cette physique sont les suivants : *existence d'un temps réellement continu, d'un espace physique absolu euclidien, d'une mécanique unique : la mécanique newtonienne*. Par la suite, la continuité s'introduit partout, les propriétés physiques sont attribuées comme propriétés intrinsèques aux objets que l'on suppose éternels. Les propagations d'ondes sont dues à des vibrations effectives d'un certain milieu et sont douées d'une réalité concrète. Enfin la physique est déterministe et s'attache d'une manière irréductible à l'objectivité totale.

La théorie de la relativité d'Einstein, la relativité restreinte et la relativité générale, ne remet pas en cause les fondements essentiels de la physique classique. Ces deux étapes de la théorie de la relativité représentent plutôt un perfectionnement, un épanouissement de la pensée physique classique. Pourtant, dès le début du XX<sup>e</sup> siècle, en même temps qu'Einstein développait sa théorie de la relativité, des contradictions très graves apparaissaient dans le cadre formel de la physique classique, incapable de rendre compte quantitativement de certains phénomènes comme le rayonnement du corps noir ou l'effet photoélectrique. Il a fallu se rendre à l'évidence : l'ensemble de la physique était en crise.

La question posée était celle du caractère continu ou discontinu des interactions et de la matière. En physique classique on n' imagine pas que les interactions puissent ne pas être continues. Certes, la première tentative de théorie de la lumière, celle de

Newton, est de nature corpusculaire. Mais les succès de la théorie de Maxwell (améliorée par la relativité) ont renforcé le préjugé classique à propos de la continuité des interactions : l'interaction électromagnétique est portée par des ondes de champ électromagnétique, et qu'y a-t-il de plus continu qu'un phénomène ondulatoire ? Ce n'est certes pas la théorie de la relativité générale pour la gravitation qui va infirmer ce préjugé.

En revanche, la physique classique accepte l'idée du discontinu, mais dans la matière, pas dans les interactions. Jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle, elle s'accommode tant bien que mal de l'hypothèse atomique (encore qu'aux échelles atomiques, elle s'attend bien à rencontrer quelques difficultés). En fait, l'hypothèse atomique (qui est la marque du discontinu) est tout simplement évacuée du champ proprement dit de la physique classique : elle ne concerne que la chimie (qu'à tort les physiciens classiques ne considèrent pas tout à fait comme une science...) et éventuellement à la thermodynamique ou à la théorie cinétique des gaz qui n'est pas non plus considérée comme très rigoureuse par les physiciens classiques. Acceptons l'hypothèse atomique pour la matière, et essayons d'étendre la physique classique aux atomes, les plus petits constituants de la matière. Comment faire pour observer un atome ? Imaginons que nous ayons su faire un appareil de mesure capable d'observer un atome. Cet appareil est, lui aussi, constitué d'atomes. Pour que cet appareil nous donne un résultat de mesure, il faut qu'au moins un de ses atomes ait reçu un signal de l'atome à observer. Ce signal doit être important à l'échelle des atomes, sinon, il ne pourrait pas donner lieu à un résultat de mesure. Mais si ce signal est important pour l'atome récepteur, il l'est tout autant pour l'atome émetteur. L'émission de ce signal par l'atome observé est une perturbation inévitable et non négligeable de l'objet d'étude. Dans l'interaction qu'est l'acte de mesure, le plus petit signal susceptible de donner un résultat de mesure est à considérer comme un atome d'interaction (on dit plutôt un quantum d'interaction). Il y a donc du discontinu dans les interactions.

La découverte du quantum d'action est un des plus importants événements de l'histoire de la science contemporaine. Elle constitue le point de départ d'une nouvelle forme de la pensée physique.

Par ailleurs, tout a commencé vers 1900, avec les recherches faites par Max Planck sur la théorie du rayonnement. Le postulat de Planck était le suivant :

*La matière ne peut émettre l'énergie radiante que par quantités finies proportionnelles à la fréquence [...] Le facteur de proportionnalité est une constante universelle, ayant les dimensions d'une action mécanique.*<sup>1</sup>

En 1900, Max Planck s'interrogeait sur le rayonnement enclos dans une cavité vide de matière et en équilibre thermique, et étudiait plus précisément<sup>2</sup> la distribution de son énergie en ses composants monochromatiques.

En 1897, Kirchhoff établit un théorème selon lequel la densité d'énergie du rayonnement  $u$  ne dépend que de la fréquence  $\nu$  et de la température  $T$ ,  $u = u(\nu, T)$ . Une tentative pour déduire une formule pour  $u(\nu, T)$  basée sur la physique classique fut menée par les physiciens anglais Lord Rayleigh et Sir Jean Jeans mais le résultat se trouva en désaccord avec l'expérience. Les constantes physiques disponibles,  $c$ , la vitesse de la lumière et  $k$ , la constante de Boltzmann, donnaient une loi de la forme  $u = (A/c^3) \nu^2 kT$  : ce fut d'ailleurs l'argument de Lorentz pour appuyer la loi de Rayleigh-Jeans.

Une autre expression fut proposée par Wien :  $u \sim \exp(-a\nu/T)$ . Le problème était le suivant : les mesures très précises de  $u(\nu/T)$  n'étaient d'accord avec la loi de Rayleigh-Jeans que pour les basses fréquences, alors qu'elles ne suivaient la loi de Wien que pour les hautes fréquences. Ce fut le mérite de Planck de trouver une interpolation entre l'expression de Rayleigh-Jeans et celle de Wien. Il réussit en 1900 en publiant ce que l'on appelle aujourd'hui la *loi du rayonnement de Planck* :

$$u(\nu, T) = [8\nu^2/c^3] [h\nu/(e^{h/kT}) - 1] \quad (1)^3$$

rigoureusement vérifiée par les mesures.

<sup>1</sup> De Broglie L., *La physique nouvelle et les quanta*, Paris, Flammarion, 1937, p. 95.

<sup>2</sup> Planck M., « A propos de la loi de distribution de l'énergie dans le spectre normal », *Annalen der Physik* 4, 553-563, 1901, trad. franç. in Leite Lopes J., Escoubès B., *Sources et évolution de la physique quantique, textes fondateurs*, Paris, Masson, 1995, p. 20-27.

<sup>3</sup>  $c$  est la vitesse de la lumière,  $\nu$  la fréquence des oscillations,  $k$  la constante de Boltzmann et  $T$  la température.

Pour justifier cette formule, Planck fut obligé d'abandonner l'hypothèse de la physique classique suivant laquelle l'énergie  $\epsilon$  d'un oscillateur et de tout système physique n'est susceptible que de changements continus. Il supposa au contraire que cette énergie ne change que par des multiples entiers d'une énergie minimale, c'est-à-dire que  $\epsilon$  est plutôt de la forme :

$$\epsilon = nh\nu \quad (2)^1$$

$h$  = quantum d'action

$h\nu$  = quantum de l'énergie.

La relation (2) faisait entrer la physique dans un nouvel univers. Comme Planck l'exprimera très bien ultérieurement<sup>2</sup>, cette loi surprenante établissait une équivalence fondamentale entre une énergie et une fréquence, relation impossible à justifier en mécanique classique. Une fréquence, en effet, qu'elle soit mécanique, électrique ou magnétique, est une grandeur locale, possédant un sens déterminé pour un lieu donné, alors que l'énergie est normalement une grandeur additive, ce qui ôte tout sens à parler d'énergie localisée.

Il existe divers processus pour mesurer le quantum d'action,  $h$ , et on sait qu'il est égal à  $6,55 \cdot 10^{-27}$  erg/sec. Comme le fait voir cette formule,  $h$  comprend deux éléments : l'énergie et le temps. On a cherché dans la nature une quantité déterminée d'énergie à laquelle est associée une période déterminée du temps. On sait que l'énergie d'un électron est déterminée, c'est une quantité connue que l'on rencontre dans toutes les parties de l'univers. Mais on n'a aucune connaissance de la durée à laquelle elle est associée. Au contraire, un train d'ondes lumineuses comporte une unité de temps qui est la période de vibration. On a trouvé que l'énergie totale provenant de l'atome du sodium pendant une émission est égale à  $3,4 \cdot 10^{-12}$  ergs. Cette énergie se développe pendant une période de temps égale à  $1,9 \cdot 10^{-15}$  sec. En multipliant ces deux éléments naturels de l'action on obtient :  $6,55 \cdot 10^{-27}$  erg/sec, c'est-à-dire

<sup>1</sup>  $n$  est un nombre entier et l'énergie minimale d'un oscillateur électromagnétique de fréquence est égale à  $h\nu$ ,  $h$  étant une nouvelle constante universelle.

<sup>2</sup> Planck M., *L'image du monde dans la physique contemporaine*, trad. franç., Paris, Gonthier-Médiations, p. 13-14.

la quantité  $h$  qui, de ce fait représente une loi de la nature. Quelle que soit la nature de la source lumineuse choisie, on obtient le même résultat numérique.  $h$  est une espèce de l'atome, mais pas un atome de matière : c'est un quantum d'action. Il est considéré comme le paramètre le plus fondamental de la mécanique quantique dans la mesure où il est présent dans toute expression quantitative ayant rapport aux phénomènes quantiques.

La découverte du quantum d'action a été annoncée par Planck lui-même le 17 décembre 1900 au cours d'une séance de la Société de Physique de l'Académie des sciences de Berlin. L'objectif initial de ce physicien était de surmonter une difficulté de la théorie du rayonnement<sup>1</sup>.

### 1.1.3. Einstein et le quantum de la lumière

D'après la déclaration de Planck, Einstein a beaucoup travaillé pour parvenir à ce résultat. Mais il n'a cependant pas réussi à prouver expérimentalement la validité de sa découverte. La preuve expérimentale de l'hypothèse du quantum d'action n'a pu être fournie qu'en 1905 par A. Einstein<sup>2</sup>. Il a réintroduit une perspective corpusculaire en théorie de la lumière en y transposant l'hypothèse des quanta de Planck.

C'est ainsi que Planck avait exigé que la matière seulement absorbe ou émette l'énergie par paquets, Einstein affirmait maintenant que, même après avoir été émis par la matière, chaque quantum d'énergie, au lieu de se comporter uniquement comme une onde pour le bon plaisir de Maxwell, devait aussi se comporter plus ou moins comme une particule : une particule de lumière, que nous appelons un « photon ».

Cette proposition avait un caractère révolutionnaire. Mais Einstein avait des atouts en main, dont le plus important était le curieux effet remarqué par Hertz près de vingt ans auparavant.

---

<sup>1</sup> Planck M., *Intuition à la physique*, Paris, Flammarion, 1941, chap. IV.

<sup>2</sup> Einstein A., « Un point de vue heuristique sur la production et la transformation de la lumière », *Annalen der physik*, vol. XVII, 1905, p. 132-148, in A. Einstein, *Œuvres choisies 1*, Quanta, Paris, Seuil, 1989, p. 39-53. Voir aussi : in Leite Lopes J., Escoubès B., *Sources et évolution de la physique quantique, textes fondateurs*, op. cit., p. 28-40.