

Quelques éléments d'histoire des sciences : atome, mécanique quantique

Thomas Boyer-Kassem
(Département de Philosophie, Université de Tilburg, Pays-Bas)
t.c.e.boyer-kassem@uvt.nl

Cours de Préparation à l'Agrégation de Physique, ÉNS de Cachan, 2016-2017

Plan

- ① Électron (L36, L39-L41)
- ② Rayons X (L36)
- ③ Le photon (L38, M12)
- ④ L'atome de Bohr (L40)
- ⑤ La mécanique matricielle et ondulatoire (L39)

- **Références générales :**

- Locqueneux, R. (2009), *Une histoire des idées en physique*. (53.1 LOC)
- Jullien, V. (2009), *L'Histoire des Sciences pour les Nuls* (5(091) JUL)
- Longair, M. S. (2003), *Theoretical Concepts in Physics*. (53.2 LON)

- **Références spécifiques :**

- Radvanyi, P. (2007), *Histoire de l'atome* (53.1 RAD)
- Uzan, J.-P. et Lehoucq, R. (2005), *Les constantes fondamentales* (53.2 UZA)
- Leite Lopes, J. et Escoubès, B., éd. (1994), *Sources et évolution de la physique quantique. Textes fondateurs* (53.2)
- et vraiment pour les détails :
Jammer, M. (1966), *The Conceptual Development of QM* (Jussieu, Physique Recherche)

Frise chronologique — Atome et mécanique quantique

- 1830 — Becquerel : effet photo-électrique
- 1834 — Faraday : loi d'électrolyse
- 1885 — Formule de Rydberg pour le spectre de l'hydrogène
- 1895 — Röntgen découvre les rayons X
- 1897 — Thomson : mise en évidence de l'électron, rapport e/m
- 1900 — Loi de Planck
- 1905 — Einstein : photon / effet photo-électrique
- 1910 — Expérience de Rutherford
- 1913 — Modèle de Bohr
- 1914 — Expérience de Franck et Hertz
- 1916 — Expériences de Millikan sur l'effet photo-électrique
- 1923 — Effet Compton
- 1924 — Théorie de de Broglie
- 1925 — Mécanique matricielle de Heisenberg, Born, Jordan
- 1926 — Mécanique ondulatoire de Schrödinger. Interprétation probabiliste de Born.
- 1927 — Davisson et Germer : diffraction des électrons. Relations de Heisenberg.
- 1932 — Formulation axiomatique de la MQ par von Neumann

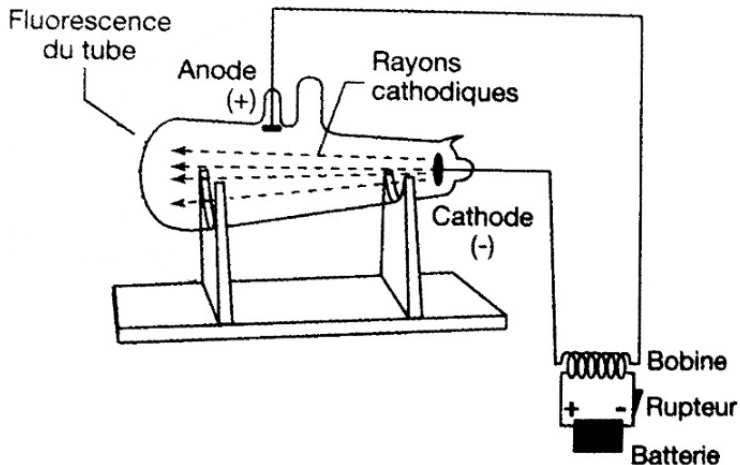
Légende : photon électron mécanique quantique

- 1 Électron (L36, L39-L41)
- 2 Rayons X (L36)
- 3 Le photon (L38, M12)
- 4 L'atome de Bohr (L40)
- 5 La mécanique matricielle et ondulatoire (L39)

- Une idée d'« atome d'électricité » : Faraday, Stoney.
- Les décharges électriques dans les gaz raréfiés :
Connu depuis le XVIIIe. Améliorations techniques.
- Le « rayonnement cathodique » (vers 1870).
- 1895 : Perrin montre que ces rayons ont une charge négative.

Locqueneux, p. 157-158. Radvanyi chap. 8.

Schéma du tube de Crookes



Tiré de Bimbot, p. 6.

- Expériences par Thomson en 1897 :
« Les expériences qui suivent ont été effectuées pour tester certaines des conséquences de la théorie de la particule électrisée [...] Comme les rayons cathodiques portent une charge d'électricité négative, qu'ils sont défléchis par une force électrostatique comme s'ils étaient électrisés négativement et qu'une force magnétique agit sur eux justement comme le ferait cette force sur un corps électrisé négativement se déplaçant le long de la trajectoire de ces rayons, je ne peux pas échapper à la conclusion qu'il s'agit de charges d'électricité négative portées par des particules de matière. »

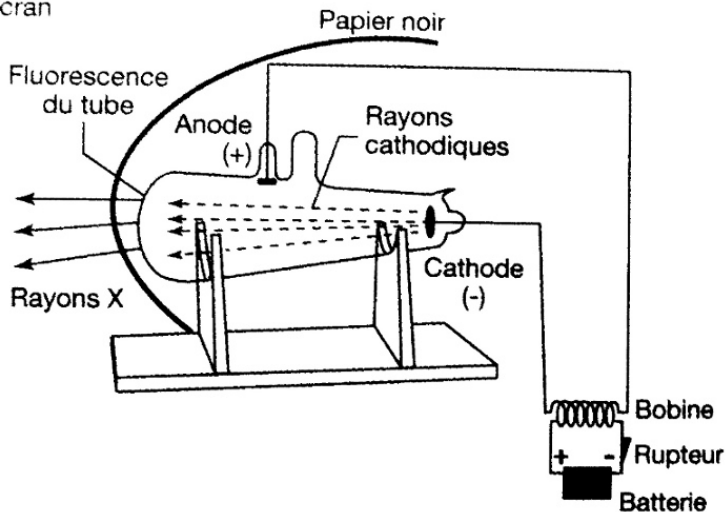
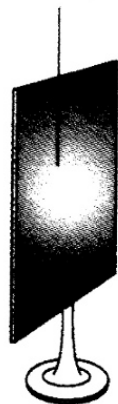
Thomson, 1897, tiré de Radvanyi p. 144.
- Thomson détermine le rapport e/m , en observant les rayons cathodiques dans des champs \vec{E} et \vec{B} .
- Déterminations ultérieures de e et m .

Plan

- ① Électron (L36, L39-L41)
- ② Rayons X (L36)
- ③ Le photon (L38, M12)
- ④ L'atome de Bohr (L40)
- ⑤ La mécanique matricielle et ondulatoire (L39)

Expérience de Röntgen

Lueur sur l'écran
fluorescent



- Contexte des années 1890 : l'étude des rayons cathodiques, depuis plusieurs décennies.
- 1895 : Röntgen découvre un rayonnement mystérieux. Étude approfondie.
- « *On constate rapidement que tous les corps sont perméables à cet agent, mais à des degrés très divers. Je donne quelques exemples. Le papier est très perméable : j'ai encore perçu distinctement la luminosité de l'écran fluorescent derrière un livre relié d'environ 1000 pages. [...] Si l'on place la main entre l'appareil à décharges et l'écran, on voit les ombres plus sombres des os de la main. [...] Le plomb d'une épaisseur de 1,5 mm est pratiquement imperméable.* »

Röntgen (1896), tiré de Radvanyi p. 161.

- Von Laue met en évidence la diffraction des rayons X par les cristaux (1912). Il s'agit donc d'une onde de très courte longueur d'onde.

La première radio par Röntgen



Plan

- ① Électron (L36, L39-L41)
- ② Rayons X (L36)
- ③ Le photon (L38, M12)
- ④ L'atome de Bohr (L40)
- ⑤ La mécanique matricielle et ondulatoire (L39)

Une « hypothèse heuristique » : les quanta de lumière

- Contexte :
 - 1900 : Planck introduit h et, formellement, des éléments d'énergie $h\nu$.
 - Nature ÉM de lumière (continue). La théorie ÉM de Maxwell avait un statut solide.
- Article d'Einstein, 1905 : « Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière. »

Cf. Uzan et Lehoucq, chap. 16.

Article d'Einstein reproduit p. 395-407 (LLE p. 28-40).

- « *Selon l'hypothèse envisagée ici [...], l'énergie est constituée d'un nombre fini de quanta d'énergie localisés en des points de l'espace, chacun se déplaçant sans se diviser et ne pouvant être absorbé ou produit que tout d'un bloc.* »

Einstein, 1905, tiré de Uzan et Lehoucq, p. 396, ou LLE, p. 29.

Cf. Locqueneux p. 164, Longair p. 348-354.

- Einstein veut ensuite montrer la fécondité de cette hypothèse.
- **Photo-luminescence** :
réémission de lumière à une fréquence différente ($\nu_2 < \nu_1$).
Explication au moyen de la conservation de l'énergie.
- **Photo-ionisation** des gaz :
un gaz éclairé en UV s'ionise ($X \rightarrow X^+ + e^-$)
Observation : seuil en λ .
Explication : il faut vaincre l'énergie d'ionisation, $h\nu = hc/\lambda > W_i$.
Cf. Cagnac et al, *Physique atomique*, 1., p. 12. Tables.

L'effet photo-électrique

Cf. Cagnac et al, *Physique atomique*, 1., p. 5-12.

Cf. Longair, p. 353. Jammer p. 33 et s.

- Des électrons sont arrachés du métal lorsque celui-ci est éclairé par de la lumière.
- Connus depuis Becquerel (1830) et Hertz (1887).
Lenard (v. 1900) :
 - les porteurs sont des électrons,
 - seuil de fréquence minimum, ν_0 ,
 - l'énergie des électrons est indépendante du flux lumineux (V_0 indépendant de \mathcal{P}).
- Pas d'explication avec la théorie ÉM :
« La conception usuelle, selon laquelle l'énergie de la lumière est distribuée de façon continue dans l'espace où elle est rayonnée, présente, quand on tente d'expliquer les phénomènes photoélectriques, de très sérieuses difficultés qui sont exposées dans un travail décisif de M. Lenard. »

Einstein, tiré de Uzan et Lehoucq, p. 405.

L'effet photo-électrique

- L'explication d'Einstein :
 - énergie de liaison de l'électron, W , qu'il faudra vaincre.
 - énergie du photon incident : $h\nu$
 - énergie cinétique disponible : $E_C = h\nu - W$.D'où le seuil : $\nu > W/h = \nu_0$.
- Prédiction d'Einstein : la contre-tension maximale V_0 que peut remonter un électron vaut :

$$V_0 = \frac{h}{e}(\nu - \nu_0)$$

- Réception : mauvaise !
- Expériences de Millikan (1916).
Millikan mesure bien que V est proportionnel à $\nu - \nu_0$.

L'effet Compton

Cf. Radvanyi, p. 229-230.

- Contexte : la connaissance des rayons X vers 1920. La diffusion est étudiée.
- 1923 : Compton reprend les expérience de diffusion.

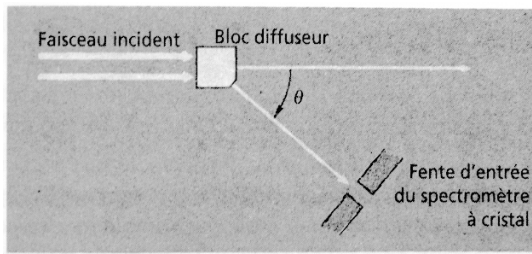


Schéma de l'expérience de Compton. Tiré de Cagnac, *Physique atomique 1*, p. 55

Plan

- ① Électron (L36, L39-L41)
- ② Rayons X (L36)
- ③ Le photon (L38, M12)
- ④ L'atome de Bohr (L40)
- ⑤ La mécanique matricielle et ondulatoire (L39)

Quel modèle de l'atome ?

- Quelle conception de l'atome vers 1900 ?

- Modèles planétaire de Perrin.
- “plum-pudding” de Thomson.

- Rutherford, vers 1910.

Expérience de diffusion de particules α par une feuille d'or.

Beaucoup ne sont pas déviées, mais certaines fortement !

« It was quite the most incredible event that has ever happened to me in my life. It was almost as incredible as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you. »

Rutherford, cité par Longair, p. 377.

- Interprétation : un noyau positif massif, des électrons.

Article de Rutherford repris par Radvanyi, p. 221-226, ou par LLE, p. 41-56.

- Formule de Rydberg pour le spectre de l'hydrogène (1885) :

$$\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Cf. Locqueneux, p. 169-170.

- Bohr (1883-1962) en visite chez Rutherford.
Comment concilier ce modèle avec une stabilité, et avec la quantification du rayonnement ?
- Modèle de Bohr (1913) :
 - point de départ : le modèle de Rutherford.
 - hypothèse d' « états stationnaires » : orbites circulaires pour les e^- , de $\sigma = n\hbar$
 - passage d'un état stationnaire à un autre : émission d'un rayonnement.

Conditions de quantification de Planck : $E_2 - E_1 = h\nu$

Cf. Locqueneux p. 169, Radvanyi p. 228, Longair p. 379.
Article de Bohr (1913) repris dans Radvanyi, p. 239-262.

Le modèle de Bohr, suite

- Bohr traite l'atome d'hydrogène.
Il rend compte des données expérimentales, et retrouve la formule de Rydberg.
Succès rapide.
- Généralisation par Sommerfeld (1916), traitement des perturbations.

Piliers de la théorie quantique jusqu'en 1925 :

- hypothèse des états stationnaires,
- règle des fréquences.
- Principe de correspondance (1918) : accord asymptotique des spectres avec la physique classique, et accord des intensités de transition.
- Règles de sélection.

L'expérience de Franck et Hertz

- Les états d'équilibre existent-ils bien dans les atomes ? Peut-on effectuer des transitions ?
- Expériences de Franck et Hertz (1914).
Vapeur de mercure, où arrivent des électrons d'énergie connue (source thermique).
- Observations :
 - les atomes irradient de la lumière (ν) seulement lorsque l'énergie des électrons est au-delà d'un seuil E_0 , tq $E_0 = h\nu$
 - la perte en énergie des électrons est de $h\nu$
 - en mesurant l'intensité des électrons qui traversent : potentiels de résonance.

Plan

- ① Électron (L36, L39-L41)
- ② Rayons X (L36)
- ③ Le photon (L38, M12)
- ④ L'atome de Bohr (L40)
- ⑤ La mécanique matricielle et ondulatoire (L39)

La mécanique matricielle

- En 1925, la théorie des quanta est un ensemble disparate : ni cohérent, ni autonome.
- La MQ est issue de deux élaborations :
 - matricielle, à Copenhague et Göttingen,
 - ondulatoire (de Broglie, Schrödinger,)
- Par rapport à Bohr, Heisenberg abandonne l'idée d'une représentation de l'atome.
- Le principe de correspondance est appliqué à la mécanique hamiltonienne.
Les relations entre données ont une écriture algébrique.
- Born et Jordan reconnaissent des matrices :
Mécanique matricielle de Heisenberg-Born-Jordan (1925).

La mécanique ondulatoire : de Broglie

- Einstein : hypothèse des quanta de lumière (1905). Reçu plus favorablement vers 1920.
- de Broglie (1924) tente une généralisation : la lumière et la matière sont des corpuscules guidés par des ondes.
- La relation entre l'onde et le corpuscule est donnée par :

$$\tilde{p} = \hbar \tilde{k} \quad \text{soit} \quad \nu = E/h \quad \text{et} \quad \lambda = h/p$$

- Condition de stabilité de Bohr réinterprétée.
- Une analogie possible ?

Mécanique du point \leftrightarrow ? MQ ?

Ppe de Maupertuis



Ppe de Fermat

Optique géométrique \leftrightarrow Optique ondulatoire

- « *The new dynamics of the material point is to the old dynamics (including Einstein's) what undulatory optics is to geometrical optics* »

de Broglie , 1923.

La diffraction des électrons

- De Broglie suggère des expériences de diffraction d'électrons, sans succès.
- Diffusion des idées de de Broglie.
Franck et Elsassner : les résultats expérimentaux de Davisson-Kunsmann (1923) sont en accord.
- Puis, expérience de Davisson et Germer (1927) :
diffraction des électrons par un cristal.
Les résultats montrent un motif de Bragg, en accord avec de Broglie.
- Expérience de G. P. Thomson (1927) : diffraction d'électrons par des films fins.
- La nature ondulatoire des électrons est finalement reconnue.

La mécanique ondulatoire : Schrödinger

- Schrödinger veut déterminer l'équation de ces ondes. Elles doivent donner des trajectoires classiques dans l'approximation des ondes localement planes.
- Schrödinger s'inspire de l'équation hamiltonienne et de l'eikonale en optique.
- 1926. Il obtient une équation d'évolution pour un champ scalaire ψ , dans l'espace des configurations.
Solutions seulement pour les valeurs propres de l'énergie.
- Appliqué à l'atome d'H : il retrouve les spectres d'émission.
- Retrouve les résultats de Heisenberg, et traite une grande variété de problèmes.
- Accueil variable !

Équivalence

- Des approches obtenues indépendamment. Très différentes :
 - Heisenberg : algébrique, non-commutatif, aucune image, plutôt concept de corpuscule.
 - Schrödinger : équations différentielles, images d'ondes.
- Les deux approches se montrent vite fécondes :
 - pour les calculs (mécanique ondulatoire utilisée pour résoudre des équations matricielles),
 - pour la formulation de la théorie,
 - pour l'élaboration de l'interprétation.
- Équivalence par Schrödinger, intertraductibilité.
- Théorie des transformations : Dirac-Jordan.
- Congrès Solvay de 1927 : "théorie des quanta"
- Puis von Neumann, 1932 : espace de Hilbert, formulation axiomatique.

L'interprétation probabiliste

- Born (1926) introduit l'interprétation probabiliste de ψ :
si $\psi = \sum a_n \psi_n$, alors a_n^2 donne la probabilité d'une observation dans l'état ψ_n .

Cf. LLE p. 126, article de Born p. 129-132.

- Born a une interprétation corpusculaire. Comparaison avec ÉM et le photon.

Relations de Heisenberg

- Heisenberg note que le formalisme mathématique est non-commutatif, mais qu'il est d'usage d'employer les concepts classiques. Source de problèmes !
- Dirac et Jordan : p et q ne peuvent pas être des valeurs piquées simultanément.
- Heisenberg (1927) :
« *Plus la position est déterminée précisément, moins l'impulsion est connue précisément et vice-versa.* »
- Pour Heisenberg, la mesure perturbe le système observé.
- Concept définissable ssi mesurable.

- Le rôle des concepts classiques :
« Les ondes et les corpuscules ne sont que des abstractions indispensables pour ramener l'expression des résultats expérimentaux à nos formes ordinaires d'intuition. »
Bohr, cité par Locqueneux, p. 176.
- Usage de concepts classiques contradictoires (dualité onde-corpuscule).
- Renoncer à une image spatio-temporelles en termes classiques. Une nouvelle logique : la complémentarité (Bohr, 1927).
- Philosophie à tonalité positiviste.

Interprétations alternatives

- Jusqu'ici : c'est l'interprétation orthodoxe, dite de Copenhague, de la mécanique quantique.
- Einstein : point de vue réaliste. Paradoxe EPR (1935).
- Mais théorème de Bell (1964) : la MQ est non-locale.
- Autres interprétations quantiques proposées :
 - mécanique de Bohm,
 - interprétation des mondes multiples (Everett),
 - ...
- Bell :
« Pourquoi est-ce que l'image de l'onde-pilote est ignorée dans les manuels ? Est-ce qu'elle ne devrait pas être enseignée, non pas comme la seule façon, mais comme un antidote à la suffisance qui prévaut ? »
- Pour en savoir plus : Boyer-Kassem, T. (2015), *Qu'est-ce que la mécanique quantique ?*, Vrin.