

Le cantique des Quantiques

Jean-François MULLER

*Cet article est dédié à la mémoire de Monsieur Jean-Pierre Lonchamp
membre de l'Académie nationale de Metz, professeur de physique
et premier président de l'Université de Metz,*

« Comprendre un problème de physique,
c'est être capable d'en voir la solution sans résoudre d'équations » :
Paul Dirac, prix Nobel de physique
et 15^e professeur lucasien de mathématique à l'Université de Cambridge.

« Les problèmes physiques compliqués deviennent très vite
hors de portée de la théorie » :
Richard Feynman, prix Nobel de physique
et professeur au *California Institute of Technology* (Caltech).

Avant-propos

Au fil de mes études de chimie, j'ai découvert petit à petit l'extraordinaire cohérence scientifique des quanta (« grains d'énergie sans masse transportés par la lumière ») qui a complètement bouleversé la physique et la chimie. Ce n'est qu'au cours de mon « post-doc » à l'Institut de physico-chimie de l'Université de Bâle, en travaillant sur la spectroscopie photoélectronique, que j'ai réellement touché du doigt la notion de conservation de l'énergie et mesuré le génie d'Einstein dont la théorie prenait alors tout son sens.

En choisissant ce titre, je souhaitais faire ressortir l'harmonie de la théorie des quanta, mais je n'avais pas encore lu l'excellent livre de Thibault Damour intitulé « Si Einstein m'était conté »¹. Dans cet ouvrage, l'auteur précise notamment la pensée de Kant dont l'un des principaux objectifs était de clarifier et d'unifier la nature des objets (espace, temps, force, matière) dont

1. DAMOUR (Thibault), *Si Einstein m'était conté – de la relativité à la théorie des cordes*, Édition Mise à jour, le Cherche Midi, 2012.

parlent les sciences physiques. Ne serions-nous pas plus heureux, disait Kant, si nous supposions que les objets en question (*res* en latin) se règlent sur la connaissance que nous en avons ? Pour cela, Thibault Damour a introduit le terme de « Kantique des Quantique ». Il avait fortement pensé en faire le titre de son livre. S'il a ensuite choisi un titre mieux adapté, il a toutefois bien souligné que nous devrions régler la notion même de réalité sur « notre connaissance » c'est-à-dire, pour ce qui concerne la physique, sur la théorie quantique elle-même. En fait, Einstein adhérait pleinement au point de vue de Kant en affirmant que seule la théorie décide ce qui est observable.

Einstein écrivait d'ailleurs à Erwin Schrödinger : « La véritable difficulté tient à ce que la physique est une sorte de métaphysique : la physique décrit la réalité. Or nous ne savons pas ce qu'est la réalité. Nous ne la connaissons qu'à travers la description qu'en donne la physique ». J'ajouterais volontiers... avec les instruments dont nous disposons à chaque étape de l'avancement des sciences. Nous en avons eu récemment l'illustration, à la fois des difficultés et des moyens nécessaires, pour deux expériences récentes du CERN² à Genève avec, d'une part la mesure de la vitesse des neutrinos et d'autre part la mise en lumière du boson de Higgs.

Pour ma part, je préfère le présent titre, car il fait mention de la joie intellectuelle qui fut la mienne tout au long de ma carrière en faisant partager aux étudiants, qui ont été amenés à m'écouter, les concepts de la spectroscopie et de la structure de la matière. Dans ce texte, qui doit rester bref, j'ai choisi, tout en rappelant quelques éléments d'histoire des sciences, une présentation aussi simple que possible permettant de comprendre les expériences fondamentales qui ont conduit à la théorie des quanta d'énergie de la lumière.

Genèse de la théorie des quanta de la lumière

Comme souvent dans l'histoire des sciences, il y a des conjonctions favorables, une sorte de maturation naturelle de divers travaux indépendants qui se complètent et tout d'un coup s'emboîtent en prenant tout leur sens. Le génie d'Einstein a été de les percevoir en intégrant plusieurs branches de la physique de son temps et d'en percevoir l'unicité, afin d'interpréter correctement l'effet photoélectrique, dans un bref article en 1905 qui lui valut par la suite son prix Nobel en 1921. Les années comprises entre 1896 et 1905 furent décisives, car elles sont concomitantes à celles de l'essor d'un lieu de formation très favorable pour qu'une telle conjonction puisse émerger. Ce lieu fut

2. CERN : l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, aussi appelée Laboratoire européen pour la physique des particules et couramment désignée sous l'acronyme CERN, est le plus grand centre de physique des particules du monde.

Le cantique des Quantiques

indéniablement l'École polytechnique fédérale de Zurich³ (ou Polytechnicum de Zürich) dont le renom et l'excellence dépassent les frontières encore aujourd'hui.

En fait, il est intéressant à ce propos de rappeler brièvement la jeunesse d'Einstein⁴. Il est né en 1879 à Ulm. Son père tenait une boutique de matériels scientifiques. Scolarisé très tôt, il inquiétait sa famille par son indiscipline et ses retards scolaires. Il ne sut vraiment lire qu'à l'âge de 9-10 ans et ses professeurs le considéraient comme un élément perturbateur de la classe qui n'aurait pas beaucoup d'avenir. Mais, dès sa douzième année, il s'intéresse intensément à la géométrie euclidienne, l'algèbre et le calcul. À 15 ans, tandis que sa famille s'installe en Italie du Nord, il reste dans son lycée à Munich.

Mais, très vite, il ne supporte plus les méthodes pédagogiques de son établissement qui, selon lui, bloque l'envie d'apprendre et inhibe la créativité. Il se heurte violemment à la hiérarchie de son lycée et de ce fait, il est contraint de rejoindre sa famille en Italie. Là-bas, il se cultive par lui-même et écrit un bref essai sur les effets du magnétisme dans l'éther !

À 16 ans, il décide de se présenter, deux ans avant l'âge légal, au concours d'entrée au Polytechnicum de Zürich. Malgré d'excellentes notes en mathématique et en physique, il échoue à cause de son inculture dans les autres matières. Sur les conseils du directeur du « Poly », il retourne dans un lycée à Aarau en Suisse parfaire sa culture générale tout étant logé dans la famille d'un professeur. L'année suivante, à 17 ans en 1896, il réussit cette fois le concours avec des notes maximales en physique et mathématique. Durant les quatre années suivantes, il suit le cursus du Diplôme de physique et de mathématique du « Poly ». En réalité, il est plus souvent dans les cafés du centre ville où il discute avec un cénacle de bons amis dont Angele Basso, lequel l'initie aux idées de la mécanique d'Ernst Mach⁵, et Martin Grossmann, un de ses professeurs de mathématique qui lui fait partager ses connaissances en géométrie non euclidienne. Ces lieux enfumés et chaleureux sont pourtant propices à la confrontation des idées au cours de longs échanges passionnés : un vrai bouillon de culture libre dans lequel Einstein excelle par son charisme et sa culture scientifique. Dans le même temps, il noue une romance avec une étudiante de sa promotion, Mileva Maric, elle-même bonne mathématicienne, qui deviendra par la suite sa première épouse. Enfin, il suit avec passion les

3. ETHZ c'est-à-dire *Eidgenössische Technische Hochschule Zürich* ou plus simplement l'ETH ou encore « Poly ».

4. fr.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein.

5. Ernst МACH (1838-1916), physicien et physiologiste à l'université de Vienne. Père de la vitesse supersonique.

cours d'un des très grands mathématiciens de son temps, Hermann Minkowski, père de la théorie de l'espace-temps, laquelle sera décisive pour élaborer la relativité restreinte puis la relativité générale.

On le voit, son parcours est celui d'un élève surdoué, indépendant et autodidacte. La bibliothèque du « Poly » est bien fournie et Einstein travaille dans le texte les travaux de James Maxwell qui a unifié l'électromagnétisme et l'optique, de Ludwig Boltzmann père de la thermodynamique, de Max Planck qui a mesuré la constante universelle éponyme et aussi ceux de Helmholtz. Tout particulièrement, il assimile seul les équations de Maxwell, ce qui exige un excellent niveau en mathématique. Dans les cursus de l'époque, ces équations n'étaient en général qu'effleurées.

Mais cette indépendance le classe comme un élément « ingérable » et il cherche longtemps un poste académique qui puisse lui convenir. Ce n'est qu'en 1902 qu'il finira par trouver un poste de fonctionnaire à l'Office des brevets de Berne, ce qui lui permet tout juste de vivre avec sa famille tout en poursuivant ses travaux. Il y retrouve son vieil ami Basso avec lequel il reconstitue un cénacle, mais cette fois dans les tavernes de Berne. C'est ici, entre famille et bons copains, que la théorie des quanta et celle de la relativité restreinte vont voir le jour en cette fructueuse année 1905.

Les éléments essentiels qui ont permis d'élaborer la théorie des quanta de la lumière

La vitesse de la lumière

La vitesse de la lumière⁶ est un des éléments fondamentaux. La première évaluation de la vitesse de la lumière (environ 212 000 km/s) a été faite par l'astronome danois Ole Römer en 1676 en étudiant le cycle des éclipses du

6. http://fr.wikipedia.org/wiki/Vitesse_de_la_lumi%C3%A8re: La vitesse de la lumière n'est pas une constante physique en soi. Elle ne coïncide avec la constante physique c que dans le vide, et uniquement parce que les photons ont une masse nulle. La constante universelle c a été mesurée dans le vide avec une très grande précision soit 299 792,45818 km/s ou 299 792 458,18 m/s. C'est une constante physique fondamentale. Elle est notée c (du latin *celeritas*, vitesse). Elle n'est pas seulement constante en tous les endroits (et à tous les âges) de l'univers ; elle est également constante d'un repère inertiel à un autre. En d'autres termes, quel que soit le repère inertiel de référence d'un observateur ou la vitesse de l'objet émettant la lumière, tout observateur obtiendra la même mesure. Étant donné la précision actuelle de la mesure à l'aide d'un laser He-Ne, il a été décidé en 1983 que le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 seconde.

satellite Io de Jupiter. La première mesure expérimentale dans l'air a été effectuée par le physicien français Hyppolyte Fizeau à l'aide d'un ingénieur dispositif optique permettant de faire passer un faisceau lumineux, en aller et retour, entre sa maison de Suresnes et son laboratoire placé sur la butte Montmartre (8 633 mètres de distance), à travers le cran d'une roue dentée. En ajustant finement la vitesse de rotation de la roue dentée, il a réussi à bloquer la sortie du faisceau après chaque cran de rotation. Résultat, la lumière ne passe plus vers la lunette d'observation réceptrice.

Connaissant la distance entre les deux sites et la vitesse de la roue dentée en radian par seconde, il a trouvé la valeur de 315 000 km/s par un simple calcul avec seulement 4,3 % d'erreur ! Par la suite, le dispositif a été perfectionné par Alfred Cornu. En 1878, Albert Michelson, alors âgé de 25 ans, « bricole » un dispositif à miroir tournant et trouve la valeur de $300\,140 \pm 480$ km/s qui encadre la valeur actuelle. Quatre années plus tard, Simon Newcomb améliore encore la précision de la mesure. À l'aide d'un dispositif équivalent mais plus précis, il obtient la valeur de $299\,860 \pm 30$ km/s.

Dès lors, la vitesse mesurée dans l'air est suffisamment précise et reproductible pour penser à une constante physique fondamentale. Dans le même temps, James Maxwell unifie l'électromagnétisme et l'optique et démontre clairement la nature ondulatoire de la lumière. C'est une onde électromagnétique, c'est-à-dire en fait la combinaison d'un champ magnétique oscillant et d'un champ électrique oscillant qui se propage à la vitesse dite de la lumière (figure 1). James Maxwell démontre par ailleurs que la vitesse de propagation est égale à l'inverse de la racine carrée de deux autres constantes fondamentales, la perméabilité magnétique μ_0 et la permittivité du vide ϵ_0 ⁷. Selon lui la vitesse de propagation dans le vide est donnée par l'expression suivante : $c = 1/(\mu_0 \cdot \epsilon_0)^{1/2}$. La longueur d'onde λ de reproduction du phénomène identique à lui-même (par exemple valeur nulle simultanée des deux champs, cf. figure 1) est égale au rapport de la vitesse de la lumière c en mètres par seconde sur la fréquence de reproduction du phénomène ν qui est un nombre d'évènements par seconde : $\nu = c/\lambda$ ou $\lambda = c/\nu$

7. La perméabilité magnétique du vide μ_0 est une constante universelle qui, multipliée par un facteur sans dimension, donne la perméabilité magnétique de chaque matériau μ , ce qui permet de mesurer le champ magnétique effectif (B) de celui-ci lorsqu'il est soumis à une excitation magnétique extérieur (H).

La permittivité diélectrique du vide ϵ_0 a été introduite en électrostatique dans la loi de Coulomb. C'est également une constante universelle. La permittivité diélectrique d'un matériau est définie comme le rapport entre la norme du vecteur champ de déplacement électrique au sein du matériau et celle du champ électrique appliqué au matériau. La constante ϵ_0 peut être vue comme la permittivité intrinsèque du vide.

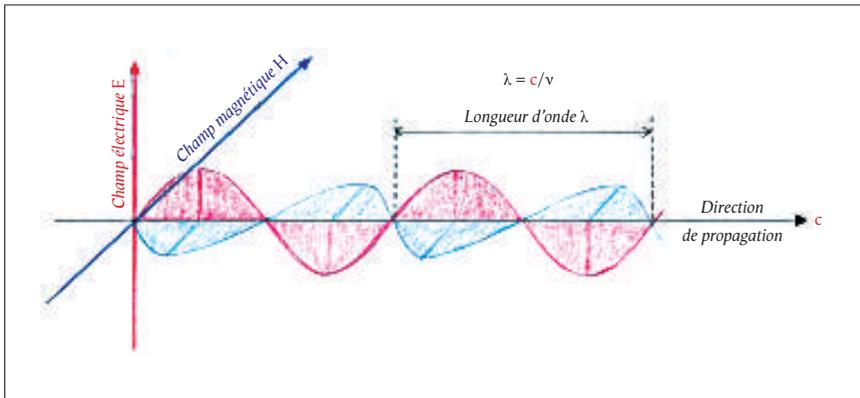


Figure 1 : La lumière est à la fois un champ électrique et un champ magnétique oscillant qui se propagent selon une direction donnée. La vitesse de propagation varie selon le milieu traversé.

À ce stade, en 1885, il y a déjà une parfaite cohérence entre la vitesse mesurée (299 860 km/s) et la vitesse théorique définie par l'expression de Maxwell, soit 299 863 km/s ! Il est aisé d'imaginer le retentissement des équations de Maxwell dans la communauté scientifique d'alors et, par la suite, l'intérêt qu'Einstein a su leur porter.

La découverte des ondes hertziennes

Dans les années qui suivirent, la physique expérimentale eut un développement extraordinaire. En particulier, Heinrich Hertz, professeur à l'École polytechnique de Karlsruhe, se révéla être un expérimentateur de génie puisqu'il découvrit les ondes, à l'époque inconnues, qui portent désormais son nom : les ondes hertziennes. Très vite, il a acquis la conviction qu'il s'agissait d'ondes électromagnétiques se propageant à la vitesse de la lumière mais de fréquences beaucoup plus basses. En 1887-1888, il réalisa plusieurs expériences remarquables, la plus significative étant la bobine d'induction reportée en figure 2.

Après de très nombreux essais, Hertz déduisit que cette atténuation était due à l'absence de la lumière bleutée de la décharge électrique produite en A. Indéniablement, la lumière bleutée avec une part de lumière ultraviolette amplifie le phénomène de transmission. Mais il ne put à cette époque en expliquer la raison. C'est un de ses élèves, Philipp Lenard, qui, quinze plus tard en 1900, apporta la preuve expérimentale de l'effet photoélectrique en réalisant le montage expérimental qui prenait en compte à la fois l'expérience d'Heinrich Hertz et celle de Joseph John Thomson en 1897.

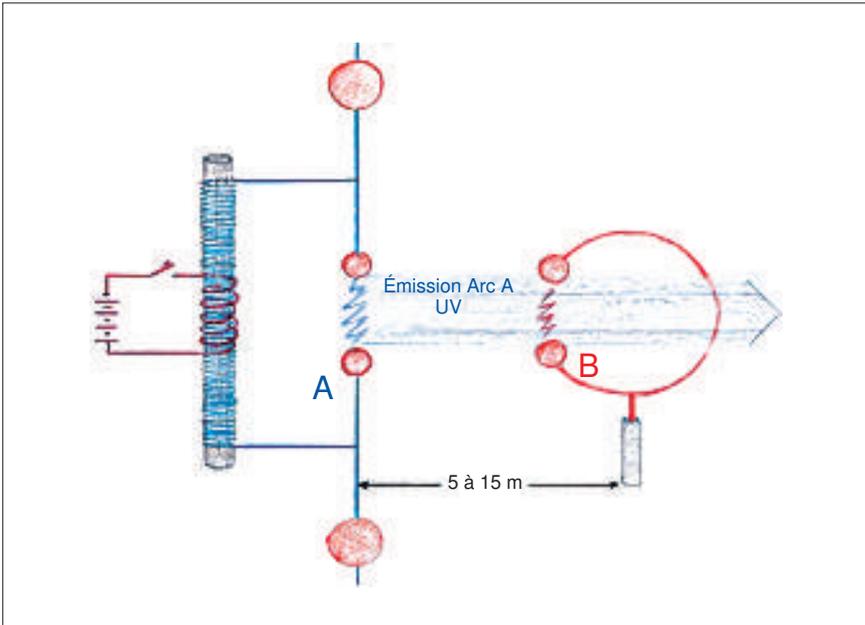


Figure 2 : Schéma simplifié d'une bobine d'induction (bobine Ruhmkorff) : en augmentant progressivement la tension dans le circuit A, des éclairs bleutés se forment entre les deux boules du condensateur en A. Si le circuit B est très éloigné, rien ne se passe. Mais en le rapprochant progressivement, à une certaine distance, une décharge d'intensité plus faible, mais visible, s'établit entre les deux boules du circuit en cuivre B uniquement lorsque l'arc électrique est établi en A. Il y a bien transmission de la charge à travers l'espace. Pour être sûr qu'il y a bien la transmission entre les circuits A et B, Hertz enferma le circuit B dans une boîte en carton empêchant toute illumination du circuit B. En fait, l'arc en B se produit à nouveau lorsqu'il se produit en A, mais il est systématiquement atténué lorsque le circuit B est enfermé dans la boîte.

La première expérience de J.J. Thomson démontrant l'effet photoélectrique

L'expérience de Thomson en 1897 est très simple. Elle est basée sur une expérience classique d'électrostatique parfaitement codifiée à cette époque (figure 3).

Thomson en déduisit logiquement qu'un faisceau UV de courte longueur d'onde et par conséquent de plus grande fréquence, est capable d'arracher au métal (ici le zinc) des charges négatives, ce que ne peut faire la lumière visible (jaune) pour ce même métal. En fait, cette perte de charge était due à l'arrachement d'électrons du métal (ici le zinc).

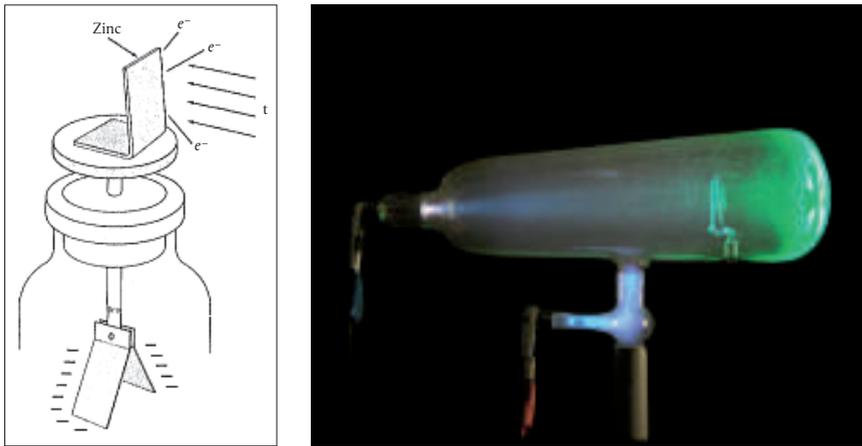


Figure 3 : Expériences de J.J. Thomson : **à gauche**, l'électroscope ; la 1^{re} étape consiste à placer une lame de zinc fraîchement polie au contact du support métallique supérieur en cuivre qui est lui-même en contact avec deux lames très fines de cuivre ou d'aluminium qui sont proches mais séparées l'une de l'autre. 2^e étape : on met en contact la partie supérieure avec un bâton d'ébonite (règle en plastique chargée négativement par frottement avec un chiffon de laine) ; les charges négatives sont transmises aux deux lames inférieures qui se repoussent comme indiqué sur la figure (répulsion électrostatique). 3^e étape : la lame de zinc est irradiée par une lampe riche en lumière ultraviolette (UV). Une lampe à vapeur de mercure dans une ampoule en silice pure ; les deux lames se déchargent et reprennent une position verticale. Note : si l'électroscope avait été préalablement chargé positivement par une baguette de verre frottée avec du nylon, l'illumination UV ne provoque aucune décharge, les deux lames restent écartées. Même constat si la lame de zinc est irradiée par la lumière du jour ou par une lampe classique.

À droite : la mise en évidence d'un faisceau d'électron avec un tube de Crookes. La cathode émettrice d'électrons est à gauche ; l'anode chargée positivement est située en dessous. La croix de Malte en métal bloque le faisceau d'électrons, ce qui crée une ombre de même forme au fond du tube rendu en partie luminescent par les électrons non arrêtés qui frappent la paroi de verre.

Il convient, à ce stade, de préciser qu'au cours de la même année 1897, Thomson avait mis en évidence pour la première fois un faisceau d'électrons grâce sa célèbre expérience du tube cathodique (tube de Crookes)⁸. Il est donc l'inventeur de l'électron puisqu'il mit en évidence qu'un faisceau d'électrons, tel que celui mentionné dans la légende de la figure 3, pouvait être dévié par un aimant. Par la suite, il démontra qu'un faisceau d'électrons accélérés était capable d'ioniser un gaz comme l'air que nous respirons, créant ainsi des ions positifs qui pouvaient être déviés sélectivement par un aimant en fonction du

8. <http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectron>

rapport masse sur charge de ces ions. Il est de ce fait, l'inventeur de la spectrométrie de masse. Ainsi la détermination de la composition d'un gaz devint possible en une seule expérience. Prix Nobel en 1906, quel formidable physicien il fut !

Dans la foulée, Philipp Lenard, alors professeur de physique à l'Université d'Heidelberg, se rappelant parfaitement son assistantat auprès de Hertz, décida d'utiliser la technique de Thomson pour tenter de mieux comprendre l'effet photoélectrique.

Les expériences décisives démontrant l'effet photoélectrique

Lenard construisit un tube de Crookes du même type que celui utilisé par Thomson, mais il fit trois modifications majeures (figure 4): 1- en premier lieu, il le relia à une pompe à vide mécanique permettant d'y assurer un bon

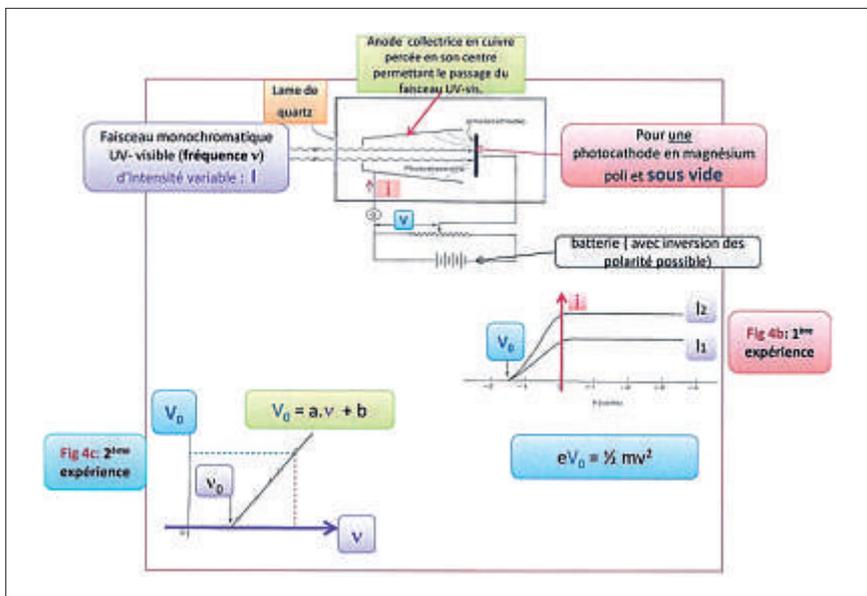


Figure 4 : En haut, la figure 4a représente le dispositif expérimental de Lenard comportant une ampoule cylindrique sous vide au sein de laquelle est insérée une photocathode en magnésium poli et une anode en cuivre tronçonné percée en son centre. Une fenêtre en quartz pur permet le passage de faisceaux UV. La figure 4b (1^{re} expérience) montre la valeur du courant mesuré pour deux valeurs d'irradiation du faisceau UV mono-chromatique en fonction de la tension appliquée. La figure 4c (2^e expérience) illustre la variation linéaire de la tension limite V_0 (à partir de laquelle le courant ne passe plus) en fonction de chaque fréquence du faisceau d'irradiation.

vide afin de minimiser les collisions des électrons avec les gaz ; 2- ensuite, il fabriqua une cathode en magnésium soigneusement polie à l'abri de l'air pour éviter toute oxydation tandis qu'une anode de forme tronconique en cuivre percée en son centre était installée en face de la cathode de façon à mieux collecter les éventuels électrons émis. Les connexions électriques sont noyées dans le verre fondu assurant ainsi une parfaite isolation du circuit électrique ainsi que l'étanchéité ; 3- de plus, il inséra une lame de quartz ultra-pure en bout de tube et réalisa à l'aide d'un verrier une soudure quartz-verre afin d'assurer l'étanchéité pour maintenir le vide. Cette lame en quartz pur, transparente à la lumière ultraviolette (UV), permet à un faisceau monochromatique⁹ ultraviolet de passer à travers l'anode trouée en son centre et d'irradier la surface de magnésium de la cathode, appelée photocathode ; 4- enfin, il relia l'anode au pôle plus (+) d'une alimentation en courant continu (batterie) et la photocathode est reliée au pôle moins (-). Un rhéostat est inséré afin de varier la tension appliquée V entre anode et cathode. En plus, un système de résistances variables a été ajouté pour être en mesure d'inverser les polarités. Pour compléter le dispositif, l'intensité I de la lampe émettrice peut également varier (figure 4a). Pour l'époque, cette expérience relève d'un véritable exploit technologique.

Avec la photocathode en magnésium, Lenard règle en premier lieu le monochromateur¹⁰ sur une longueur d'onde (300 nm)¹¹, correspondant à une longueur d'onde du proche ultra-violet du spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure haute pression qui couvre tout le spectre visible et ultraviolet¹².

La première expérience, consiste à mesurer l'intensité (i) du courant en fonction de la tension appliquée V pour une longueur d'onde fixe du faisceau UV. Tant que la tension est positive, l'intensité du courant ne varie pas. S'il réalise la mesure avec une lampe éclairant plus fortement ($I_2 > I_1$) la photocathode, certes l'intensité (i) du courant mesuré augmente mais elle ne varie pas en fonction de la tension appliquée. Première surprise (figure 4b).

En effet, dans le vide, le courant aurait dû être nul quelles que soient les conditions expérimentales. Or, dans les conditions précitées, un courant a bien été mesuré. La seule explication rationnelle est qu'il y avait bien

9. Un faisceau monochromatique (ou une seule couleur) implique une seule longueur d'onde (ou fréquence).

10. Un monochromateur permet de sélectionner une longueur d'onde (ou une fréquence donnée) à l'aide d'un prisme en quartz pur ou aujourd'hui à l'aide d'un réseau.

11. Un nanomètre (nm) équivaut à un milliardième de mètre, soit 10^{-9} mètre.

12. Aujourd'hui, on utilise une lampe au xénon haute pression du type de celles qui équipent les phares de voiture.

arrachement d'électrons de la photocathode vers l'anode assurant ainsi le transport du courant électrique. L'expérience de l'électroscope était bien confirmée.

Alors, Lenard eut l'idée de faire la même expérience mais en inversant les polarités lorsque la tension V était égale à zéro. En augmentant, cette fois, la tension négative appliquée (partie gauche de la figure 4b), il eut une deuxième surprise : l'intensité du courant décroît pour les deux illuminations différentes de la lampe d'irradiation et s'annule pour la même valeur de la tension négative V_0 . Au-delà de V_0 plus rien ne passe. La seule explication plausible, c'était que la tension négative repoussait les électrons, les empêchant d'atteindre l'électrode collectrice en cuivre.

La deuxième expérience faite par Lenard fut tout aussi rationnelle que minutieuse : que se passerait-il si l'on faisait varier la longueur d'onde du faisceau UV incident ? Il eut une troisième surprise et cette fois de taille.

Il reprit la même expérience avec une dizaine de longueurs d'onde sélectionnées par le monochromateur allant de l'ultraviolet vers le visible (la longueur d'onde augmente tandis que la fréquence correspondante diminue si applique la relation $\nu = c/\lambda$) (vide infra page 5 et figure 1, page 6).

À chaque longueur d'onde, il dut régler l'intensité de la lampe afin que l'intensité d'irradiation I soit rigoureusement la même.

Il mesura pour chaque longueur d'onde d'irradiation de la photocathode en magnésium, la valeur limite de V_0 . Résultat, la valeur de V_0 varie linéairement¹³ avec la fréquence d'irradiation et, surtout, il y a une fréquence limite ν_0 au-delà de laquelle il n'y a plus de courant quelles que soient les conditions expérimentales (figure 4c), même avec une très forte intensité de la lampe d'irradiation.

Lenard publia ses résultats dans la foulée en 1900, ce qui lui valut le prix Nobel de Physique cinq ans plus tard, mais il ne sut en donner l'explication rationnelle.

Dès 1901, Einstein, qui venait de lire les récents travaux de Max Planck sur l'émission du rayonnement d'un corps noir chauffé à différentes températures, lut également ceux de Lenard avec beaucoup d'intérêt. Il sentit tout de suite que la juxtaposition de ces deux travaux totalement indépendants pouvait lui apporter une clé décisive pour comprendre le rôle mystérieux de la lumière dans de nombreux processus physiques. La nature ondulatoire de la lumière telle que définie par Maxwell n'expliquait pas tout.

13. Variation linéaire selon une équation du premier degré [$y = a \cdot x + b$] , ici [$V_0 = a \cdot \nu + b$] où ν est la fréquence, tandis que a et b représentent des constantes mesurées à partir de la droite expérimentale (cf. figure 4c en figure 4).

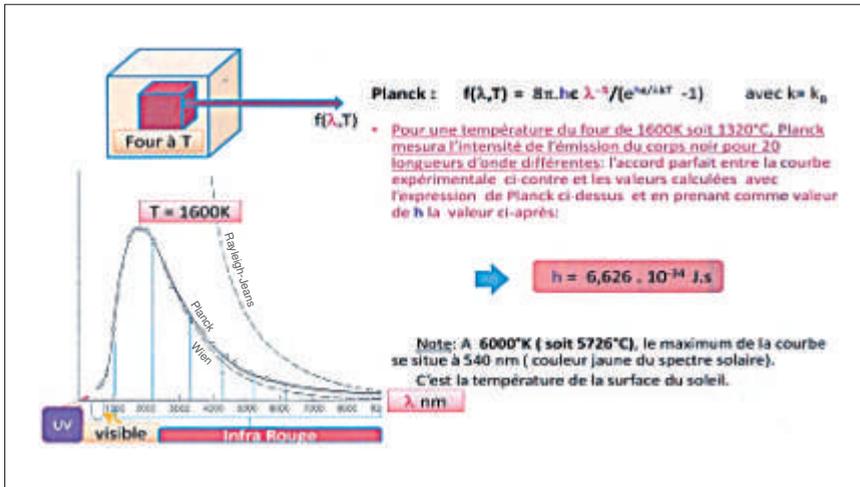


Figure 5 : Représentation d'un four porté à 1 320 °C. Par le trou dans la paroi, le rayonnement infrarouge est mesuré en fonction de la longueur d'onde exprimée en nanomètre. Chaque cercle représente pour chaque longueur d'onde l'intensité de l'émission. La courbe pointillée dite de Rayleigh-Jeans ne traduit pas la baisse d'intensité vers les courtes longueurs d'onde UV. La courbe de Wien n'était pas en accord avec les intensités mesurées à grande longueur d'onde. Seule l'expression de Planck est en accord parfait quand la valeur h correspond à celle indiquée ci-dessus.

L'interprétation d'Einstein en 1905

Revenons sur les travaux de Planck en 1900. Quelques années auparavant, Wilhelm Wien avait mesuré l'émission d'un corps noir représenté par un four dont les parois intérieures sont noires et disposant sur l'une des faces un trou qui est en quelque sorte un corps noir parfait. En effet, tout rayonnement (lumière du jour) qui entre par ce trou est totalement absorbé après de multiples réflexions à l'intérieur des parois.

Par contre, si la température du four augmente graduellement, il émet de la lumière qui, de l'infrarouge (invisible) passe au rouge sombre puis au rouge vif pour devenir blanc (« chauffé à blanc » dit-on souvent pour un métal initialement noir). Wien eut donc l'idée de mesurer, à l'aide d'un spectroscope doté d'un prisme sur une platine tournante, le spectre de la lumière émise en fonction de la température du four. Il modélisa la courbe en cloche obtenue, dont le maximum se déplace vers les courtes longueurs d'onde en fonction de la température du four (figure 5). Il obtint une formule relativement simple qui simule la répartition en longueur d'onde de l'émission du corps noir en fonction de la température.

Le cantique des Quantiques

Quatre ans plus tard, deux équipes d'expérimentateurs de l'Université de Berlin en relation avec Planck reprennent les mesures de Wien. Toutes deux trouvent indépendamment les mêmes écarts vers les faibles longueurs d'onde c'est-à-dire dans l'infrarouge lointain. Ils font alors part de leurs résultats à Planck, lequel par une analyse mathématique séquentielle de la courbe d'émission pour une température donnée du four, trouve une formule plus élaborée qui reproduit parfaitement chaque point de la courbe expérimentale (figure 5). Dans cette expression, Planck introduit une constante de calibration nécessaire extrêmement faible qu'il appelle h . Cette constante universelle s'appelle désormais la constante de Planck¹⁴ :

$$f(\lambda, T) = 8\pi \cdot h c \lambda^{-5} / (e^{hc/\lambda kT} - 1) \text{ ou } f(\lambda, T) = 8\pi \cdot h \nu \cdot \lambda^{-4} / (e^{h\nu/kT} - 1) \text{ avec } k = k_B$$

Dans cette dernière relation k_B est la constante de Boltzmann¹⁵ et la fréquence $\nu = c/\lambda$ (vide infra).

Cette fonction témoigne d'une très bonne connaissance de la thermodynamique et d'une idée audacieuse à savoir que le corps noir pouvait être considéré comme un oscillateur harmonique simple dont l'énergie augmentait de façon discrète soit $E_n = n$ fois $h \cdot \nu$ ou $E_n = n \cdot h\nu$. Dans l'esprit de Max Planck, il s'agissait plutôt d'un artifice de calcul permettant d'intégrer mathématiquement la courbe.

En réalité, le terme exponentiel $h\nu/k_B T$ représente le rapport de l'énergie lumineuse $h\nu$ sur l'énergie thermique $k_B T$.

Planck avait donc toutes les cartes en main pour interpréter correctement l'effet photoélectrique. Il était convaincu de la dimension universelle de sa formule, mais également convaincu de la justesse des lois de la thermodynamique. Il n'osa pas franchir un pas conceptuel audacieux : celui de dire que la lumière était constituée de grains d'énergie ce qu'Einstein appela « quanta de lumière ». Ce pas, Einstein l'a donc franchi tout en rendant hommage au travail de Planck¹⁶.

14. La constante h est égale à $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s (Joule × seconde). Elle est homogène à l'énergie en Joule multipliée par le temps en seconde. C'est une constante universelle.

15. La constante de Boltzmann est une autre constante universelle. Elle est égale à $1,381 \cdot 10^{-23}$ J·K⁻¹ (Joule par degré Kelvin). Par conséquent kT est homogène à une énergie thermique. Le rapport $h\nu/kT$ est le rapport d'une énergie lumineuse sur une énergie thermique.

16. Dans son article de 1905, Einstein a fait plutôt une analyse critique du travail de Wien en introduction de sa démonstration basée sur les données statistiques de la thermodynamique.

Selon la loi fondamentale de la thermodynamique, l'énergie d'un système est conservée. Elle peut se répartir en de multiples états. Notons toutefois qu'en 1905, la charge élémentaire n'avait pas encore été mesurée. Dans l'expérience de l'effet photoélectrique, Einstein appliqua le principe de la conservation de l'énergie :

1. La lumière apporte un quantum d'énergie directement proportionnel à sa fréquence, soit $h\nu$.

2. Une partie de cette énergie arrache des électrons du métal irradié (ici le magnésium) qui est de ce fait ionisé. Ceci correspond à l'expérience de l'électroscope). L'énergie d'ionisation E_i est aussi appelée travail d'extraction des électrons W_0 du métal irradié par le quantum d'énergie $h\nu$.

3. l'autre partie de l'énergie fournie se retrouve dans l'énergie cinétique des électrons arrachés avec une vitesse v dans le vide partiel de l'ampoule. Cette énergie cinétique $\frac{1}{2}mv^2$ (m étant la masse de l'électron) est égale à la charge de l'électron e multipliée par la tension appliquée V en volt soit eV_0 .

Ainsi la conservation de l'énergie s'exprime comme étant $h\nu = W_0 + eV_0$. Cette expression se transforma aisément en $eV_0 = h\nu - W_0$. En divisant chacun des membres de cette expression par e , on obtient la relation :

$$V_0 = (h/e) \cdot \nu - W_0/e$$

Il s'agit d'une relation linéaire du type $y = a \cdot x + b$ dont la pente est égale à h/e . La relation trouvée par P. Lenard en figure 4 est alors parfaitement explicitée. Il fallut cependant attendre l'année 1911 avec la mesure tout aussi difficile que minutieuse de la charge e par Robert Millikan pour prouver définitivement l'extraordinaire justesse de la théorie d'Einstein. En mesurant la pente de la droite de la figure 4c, page 9 et connaissant la valeur de e , il retrouva la valeur de la constante de Planck h . Millikan perfectionna le dispositif expérimental de Lenard et mesura le travail d'extraction de plusieurs métaux retrouvant chaque fois la même pente et bien sûr la même valeur de la constante de Planck. Par contre, chaque métal se caractérise par une valeur différente du travail d'extraction des électrons W_0 . La boucle était définitivement bouclée.

Conclusion

Cette extraordinaire aventure scientifique s'est passée dans un laps de temps très court, en un lieu, le « Poly » de Zürich, au sein duquel ont convergé de multiples talents, travaux et informations, avec en son centre un héros de 26 ans, anticonformiste, libre, charmeur et génial, Albert Einstein.

En fait, s'étant formé en partie en autodidacte, sa liberté de pensée et son flair lui ont permis une analyse fine, percutante et synthétique de très nombreux travaux tant théoriques qu'expérimentaux menés durant les quinze ans qui ont précédé le xx^e siècle.

Le cantique des Quantiques

Mais ce n'est qu'une partie du triptyque de l'année 1905 si fructueuse pour Einstein. Il y eut aussi la publication de la relativité restreinte ainsi que la formulation de la célèbre équation $E = mc^2$ qui établit une équivalence entre la matière et l'énergie d'un système ! Nous aurons sans doute l'occasion d'en reparler.

Comme souligné au début de cet article, s'il y eut un avant, l'après fut le théâtre d'un extraordinaire développement de la physique et de la chimie quantique, débouchant sur la structure des atomes et des molécules, la physique, les nouveaux matériaux, l'énergie nucléaire, l'électronique, etc.

Pour ma part, j'ai eu la chance de travailler sur la spectroscopie photo-électronique des molécules en phase gazeuse. Cette technique, développée dans les années soixante, dérive directement des travaux de Lenard, Planck et Einstein. Par la suite, toute ma carrière d'enseignant-chercheur s'est déroulée dans le domaine de la spectrométrie de masse inventée par Thomson. Faire ce bref partage de sciences et d'humanités c'est une façon de rendre hommage à ces hommes exceptionnels qui ont changé le cours des choses. C'est aussi partager une vraie passion. ■

Remerciements : Ils vont à mon épouse Danielle avec laquelle j'ai travaillé et partagé les sciences physiques et chimiques tout au long de nos carrières à l'Université de Metz.