Philosophia Scientiæ

Travaux d'histoire et de philosophie des sciences

18-2 | 2014

Hugo Dingler et l'épistémologie pragmatiste en
Allemagne

Les thèses et les mesures photoélectriques de Jakob Kunz (1909-1913)

Thierry Gourieux

Electronic version

URL: <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/956>

DOI: 10.4000/philosophiascientiae.956

ISSN: 1775-4283

Publisher

Éditions Kimé

Printed version

Date of publication: 15 June 2014

Number of pages: 163-194

ISBN: 978-2-84174-672-9

ISSN: 1281-2463

Electronic reference

Thierry Gourieux, « Les thèses et les mesures photoélectriques de Jakob Kunz (1909-1913) », *Philosophia Scientiæ* [Online], 18-2 | 2014, Online since 29 September 2014, connection on 02 November 2020. URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/956> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.956>

Tous droits réservés

Les thèses et les mesures photoélectriques de Jakob Kunz (1909-1913)

Thierry Gourieux

Groupe de Physique Statistique, Institut Jean Lamour
(UMR CNRS 7198), Université de Lorraine (France)

Résumé : Entre 1909 et 1913 le physicien Jakob Kunz proposa une théorie de l'effet photoélectrique fondée sur l'idée que la lumière est constituée de pulses électromagnétiques, ainsi que l'avait proposé J.J. Thomson. L'histoire de cette théorie est résumée ici en examinant plus particulièrement la façon dont Kunz exploita ses résultats expérimentaux à l'aide d'une analyse *a posteriori* de ses données.

Abstract: Between 1909 and 1913 the physicist Jakob Kunz proposed a theory of the photoelectric effect based on J.J. Thomson's idea that the light is made up of electromagnetic pulses. The story of this theory is summarized here, by examining more particularly the way Kunz exploited its experimental results thanks to a retrospective analysis of his data.

1 Introduction

L'histoire de l'effet photoélectrique, qui traite de la question de l'interaction entre lumière et matière, est intégrée à celle de la révolution quantique du début du siècle dernier [Allen 1913], [Hughes & DuBridge 1932], [Ramunni 1981], [Wheaton 2008]. Aussi cette histoire est-elle riche de théories alternatives, d'expériences et d'interprétations contradictoires, et constitue un morceau de choix pour observer et analyser dans le champ historique un pan des connaissances scientifiques en train de se construire et se déconstruire tout à la fois [Stuewer 1970], [Nugayev 1996].

L'étude qui suit se focalise sur le travail théorique et expérimental réalisé par Jakob Kunz et l'un de ses étudiants, David W. Cornelius, portant sur la

fameuse relation entre la vitesse maximale des électrons émis par un corps irradié et la fréquence du rayonnement lumineux utilisé. Kunz était un grand admirateur de J.J. Thomson et porteur de l'une de ses thèses selon laquelle la lumière serait constituée de « pulses électromagnétiques », sortes de morceaux de champ électromagnétique spatialement confinés. En 1909, Kunz proposa que l'énergie transportée au sein de ces grains lumineux soit proportionnelle au carré de la fréquence de vibration du champ électromagnétique y régnant : $E = k\nu^2$, qu'il posa comme alternative à la relation quantique : $E = h\nu$, pour interpréter l'effet photoélectrique.

Après avoir retracé le parcours scientifique de Jakob Kunz, le présent article s'attache d'abord à rappeler de façon parcellaire quelques idées de l'époque relatives à l'effet photoélectrique, en insistant quelque peu sur les vues de Thomson dont Kunz s'est largement inspiré. C'est aussi l'occasion de situer Kunz dans son temps et de donner une idée plus étoffée de l'histoire du phénomène photoélectrique au moment de la pénétration des idées quantiques, histoire trop souvent altérée dans les manuels de physique, qui ne retiennent que l'équation bilan proposée par Einstein en 1905, puis sa « vérification » expérimentale par l'équipe de Millikan en 1914-1916 [Klassen 2011].

La suite de l'article se penche plus particulièrement sur les travaux que Kunz puis Cornelius ont publiés entre 1909 et 1913, travaux qui sont assortis d'une analyse critique de la façon dont les deux hommes ont interprété leurs résultats expérimentaux. Les tableaux de nombres que les deux physiciens nous ont laissés permettent en effet d'étudier leurs données à l'aune de l'équation d'Einstein en vigueur aujourd'hui. Cet exercice apparaîtra comme un bon moyen pour détecter ou constater comment les idées pré-établies et/ou les éléments psychologiques inhérents à la nature humaine influent sur une construction scientifique. Dans le cas présent, on pourra y voir un Jakob Kunz d'abord hésitant sur l'interprétation de ses données expérimentales (son article de 1909), pencher en faveur de sa propre théorie alors même que les nouvelles données qu'il obtient auraient pu cautionner la relation proposée par Einstein (son article de 1910), puis persister dans ses idées grâce à de nouveaux résultats expérimentaux conformes à sa thèse mais dont l'analyse détaillée révèle la faiblesse des paramètres physiques mis en jeu (son article de 1911). On pourra suivre également la façon dont s'est opérée la déconstruction des thèses de Kunz sur la base de ces faiblesses qui se manifestèrent surtout au niveau des énergies impliquées dans le processus photoélectrique et qui furent (involontairement) mises en évidence par Cornelius. Ces défauts, ainsi que la légèreté avec laquelle Cornelius interpréta ses propres résultats, furent à l'origine des vives critiques que les autres équipes de recherche purent formuler à l'encontre des thèses de Kunz, au point de les invalider.

L'intérêt pour les travaux de Kunz ne se limite pas à l'analyse critique qui en est faite ici. La présente étude, même si elle ne se focalise que sur une courte période de son activité, montre déjà qu'il fut un artisan de la propagation des idées nouvelles en physique sur le sol américain. En guise d'ouverture, une des conclusions de cet article ira même plus loin en suggérant

qu'une étude plus achevée des œuvres de Kunz apporterait sans doute quelque lumière supplémentaire sur la façon dont furent reçues et diffusées les idées quantiques.

2 Quelques éléments de la vie scientifique de Jakob Kunz¹

Jakob Kunz est né le 3 novembre 1874 à Brittnau dans le canton suisse allemand d'Aargau [Stebbins 1939]. Il effectue ses études supérieures à l'École polytechnique fédérale de Zürich où il obtient son diplôme en juillet 1897 après avoir effectué un travail expérimental sur les acides sulfoniques sous la direction du chimiste Eugène Bamberger. Il trouve alors un emploi à la Société pour l'Industrie Chimique de Bâle durant les trois années qui suivent avant de réintégrer l'École polytechnique en tant qu'instructeur de physique en 1901. Il y effectue des recherches physico-chimiques sur les colorants azoïques avec Alfred Werner cependant qu'il obtient un doctorat de l'université de Zürich supervisé par Alfred Kleiner et Pierre Weiss, à la fin de l'année 1902, pour son étude de l'évolution de la conductibilité électrolytique de solutions acides en fonction de la température. En 1904, Kunz rédige et fait publier son cours inaugural sur la constitution de la matière² grâce auquel il reçoit le titre de « Privatdozent ». Entre temps, il s'est définitivement tourné vers la physique et travaille sur les propriétés magnétiques de minéraux à base de fer sous l'impulsion de Pierre Weiss, alors directeur de l'institut de physique de l'École polytechnique. Parallèlement à ces recherches, Kunz écrit un cours remarqué de physique théorique (publié en 1907) où sont développées la dynamique hamiltonienne, la thermodynamique moderne et l'électrodynamique, avec le point de vue du mécanicien atomiste.

L'année universitaire 1906-1907 marque un grand changement dans la carrière scientifique et la vie de Jakob Kunz : pour des raisons encore indéterminées, il part faire un séjour au Laboratoire Cavendish que dirige J.J. Thomson à Cambridge. Là, il s'initie à l'école anglaise qui axe ses travaux sur la structure de l'atome et ses liens avec l'existence de l'électron, des nouveaux rayonnements et de leurs interactions. Kunz participe ainsi aux recherches expérimentales sur la nature et les propriétés des « rayons canaux » (faisceaux d'ions positifs), l'un des sujets de prédilection de Thomson à cette époque.

1. Dans un souci de limitation de la taille de cet article, les références des publications de Jakob Kunz ont été volontairement omises dans cette section, de même que les références secondaires fournissant quelques détails sur ses activités. Seul est indiqué l'article obituaire de Stebbins [Stebbins 1939] qui fournit l'essentiel des étapes de la carrière de Kunz. Un fichier de ces références manquantes est disponible au format pdf sur simple demande à l'auteur.

2. Kunz y expose la théorie atomique et discute de l'existence de l'électron et de ses conséquences sur les courants électriques et sur le magnétisme.

Enthousiasmé par ce physicien hors pair, Kunz témoignera de cette année passée à Cambridge comme l'une des plus belles de sa vie.

C'est à Cambridge également que Kunz rencontre Dean Holgate, un mathématicien fortement impliqué dans le développement des universités américaines et qui l'encourage à faire carrière aux États-Unis. Kunz émigrera durant l'été 1908 pour travailler d'abord un an à l'université du Michigan (Ann Arbor) où il entamera ses recherches photoélectriques, avant de s'installer définitivement à Urbana Champaign (université de l'Illinois) où il sera promu professeur associé en 1915, puis professeur en 1923.

À son arrivée à Urbana Champaign, Jakob Kunz se voit confier la responsabilité du 3^e cycle de physique qui vient tout juste d'être mis en place. Il y encadrera le travail de nombreux étudiants dont les travaux de thèse tourneront le plus souvent autour de l'interaction lumière-matière, sujet que Kunz aborde donc en 1908-1909 par le biais de l'effet photoélectrique, de ses liens avec le problème du corps noir et les théories sur la nature et l'origine de la lumière, avec les idées de Thomson pour toile de fond. Les expériences qu'il va réaliser entre 1908 et 1911 sont le prélude à de longues investigations sur la construction et l'utilisation pratiques de cellules photoélectriques ultra-sensibles dans les domaines les plus divers dont le premier sera l'astronomie : à l'automne 1911, en effet, Kunz rencontre Joel Stebbins, le directeur de l'observatoire astronomique de Urbana Champaign, avec qui il entame une activité permanente et complice centrée sur la mesure du photocourant issu de la lumière des étoiles. Pour ce faire, Kunz parvient à réaliser des cellules photoémissoires aux performances inégalées qui finiront par équiper une demi-douzaine d'observatoires américains jusqu'à l'arrivée des photomultiplicateurs dans les années 1940. Spécialiste de l'effet photoélectrique, il siège aux côtés de Millikan dans le comité dédié à cet effet au sein du Conseil National de la Recherche américaine.

Kunz fera également la connaissance d'autres personnages sur le campus de Urbana Champaign avec qui il contribuera à divers travaux d'application où ses cellules photoélectriques seront à l'honneur. Mais c'est avec l'ingénieur-physicien Joseph Tykocinski Tykociner qu'il se lie plus particulièrement. Pionnier du cinéma parlant et futur promoteur de la zététique, Tykociner réalise, le 9 juin 1922 dans les locaux de l'université, la première démonstration publique d'un film muni d'une piste sonore optique qui restitue le son grâce à une cellule photoélectrique développée par Kunz. Dans les années qui suivent, Kunz et Tykociner travaillent ensemble au développement de cellules toujours plus performantes tout en analysant les différents phénomènes physiques auxquels ils font face. Peu avant sa mort, survenue brutalement le 18 juillet 1938, Kunz innovait encore, avec Tykociner et L.P. Gardner, un procédé de photosensibilisation de la surface des métaux alcalins; procédé pour lequel Tykociner et Gardner déposeront un brevet qu'ils partageront avec Anna Kunz (née Bolliger), la femme de Jakob, qu'il avait amenée de Suisse en 1913 et avec qui il eut deux enfants : Anna Maria et Margaret.

Dans cet aperçu succinct des recherches expérimentales de Kunz, il faut encore ajouter la détermination de la constante de Planck ($h = 6.58 \times 10^{-34} \text{ J.s}$) avec E.H. Williams en 1923 à partir d'une vapeur de césium photo-ionisée, une série d'études sur les phénomènes de décharge en forme de couronne lumineuse, la mise au point, avec Tykociner, d'un sélecteur de vitesses pour la mesure du moment magnétique atomique, ainsi que des travaux sur le pouvoir rotatoire optique de solutions chimiques réalisés sur la fin de sa vie.

Au-delà de la notoriété médiatique que les applications pratiques de ses cellules lui ont apportée, Kunz fut également perçu comme le leader intellectuel de la physique en Illinois et laisse une production théorique significative qui le montre à la pointe des problèmes fondamentaux de la physique de son époque. Il n'a en effet jamais cessé de publier sur ces questions : le problème du corps noir, les thèses relativistes, la nature de la lumière, leurs rapports avec l'électron et l'effet photoélectrique, tout comme le magnétisme et la théorie atomique de Bohr et Sommerfeld (avec lequel il entretient des relations amicales), ont préoccupé son esprit tout au long du premier quart du vingtième siècle. À ces contributions, s'ajoutent d'autres incursions théoriques relatives à la diffusion de la lumière ou encore à propos des décharges induites dans les gaz par les champs électromagnétiques qu'il étudie aussi expérimentalement. Il ponctue également ses activités par quelques études académiques qu'il publie régulièrement, sans doute au gré des cours réputés qu'il assure au sein du département de physique de Urbana Champaign. La carrière scientifique de Jakob Kunz s'illustre ainsi par plus de soixante-dix notes et articles réguliers qui jalonnent les années de construction de la théorie quantique et qui font clairement de lui l'un des promoteurs de la physique moderne aux États-Unis.

3 L'effet photoélectrique aux débuts du siècle dernier ; les idées de Thomson ; la relation entre vitesse et fréquence

En 1907, les idées de la communauté physicienne à propos du phénomène photoélectrique sont loin d'être claires et unanimes. Elles sont toutefois portées par une image classique modifiée par Philipp Lenard à la suite de ses expériences réalisées entre 1898 et 1902 à Kiel [Wheaton 1978] : quand ils sont soumis au champ électromagnétique oscillant d'une onde lumineuse, les électrons, supposés décrire des trajectoires périodiques au sein des atomes constituant le corps irradié, sont stimulés par un phénomène de résonance lorsque la fréquence de l'onde s'accorde avec celle de leur mouvement orbital, entraînant ainsi leur libération³ et leur participation à un courant photoélectrique. Cette conception laissait naturellement penser que la vitesse des électrons photoémis

3. Libération dont on supposait communément qu'elle s'accompagnait d'une sorte d'explosion de l'atome.

est fonction de l'intensité lumineuse que ceux-ci ont reçue. Or, les expériences de Lenard, qui avait pu mesurer leur vitesse maximale en 1902, montraient que ce n'était pas le cas : cette vitesse variait uniquement avec la composition spectrale du rayonnement utilisé et la nature du corps irradié (généralement un métal). La sauvegarde de la vision classique nécessitait donc de réviser la façon dont les échanges énergétiques entre lumière et matière s'opéraient. C'est ce que fit Lenard en proposant que les conditions du mouvement de l'électron au sein de l'atome étaient telles, que l'énergie lumineuse incidente ne servait qu'à stimuler son extraction (« *the triggering hypothesis* ») sans jouer un rôle prépondérant sur sa vitesse d'éjection qui devait être prédéterminée par son mouvement intra-atomique initial. Tout un éventail de ces trajectoires intra-atomiques – et donc de fréquences associées – étant supposé être accessible aux électrons, il apparaissait ainsi qu'une lumière excitatrice dont la fréquence serait en accord avec une fréquence intra-atomique était capable de stimuler l'éjection d'électrons d'une vitesse particulière.

À ces considérations s'ajoutaient d'autres questions non résolues comme celle relative à l'origine des électrons participant au processus photoélectrique : étaient-ils vraiment des électrons participant à la structure intime de l'atome ou alors des électrons libres au sein du métal comme ceux proposés par Drude et Lorentz ? Ou bien encore des électrons de valence comme ceux proposés par les chimistes ? L'origine de la « fatigue photoélectrique⁴ », que l'on observait couramment, était également sujette à controverses, de même que l'influence de la température du corps irradié, etc. [Allen 1913].

Au-delà de ces réflexions, qui concernaient un effet photoélectrique observé dans la partie visible et ultra-violet du spectre lumineux, les physicien(nes) étaient également confrontés à un phénomène similaire observé avec les nouveaux rayonnements X⁵ qui possédaient un très haut pouvoir pénétrant et dont la nature était encore énigmatique. L'idée dominante, peu avant 1907, portée surtout par l'école anglaise (Stokes (qui décède en 1903), Thomson, Barkla...) et par Sommerfeld sur le continent [Wheaton 2008], était de décrire ces rayonnements, générés lors de la rencontre entre un faisceau d'électrons et une anode réceptrice, comme des impulsions électromagnétiques concentrées dans une coque sphérique d'épaisseur donnée ; impulsions qui prenaient naissance lors de la brusque décélération des électrons, conformément aux équations de Maxwell. Les rayons X étaient donc une lumière d'un type très particulier, mais cette conception se heurtait au problème de la répartition isotrope de l'énergie au sein de ces impulsions sphériques : on comprenait mal pourquoi le taux d'ionisation des gaz par ces rayons X s'avérait expérimentalement très faible alors qu'en vertu de cette répartition isotrope les atomes gazeux auraient

4. Il n'était pas rare d'observer une chute du courant photoélectrique au bout d'un certain temps d'irradiation. La raison en est essentiellement la rapide modification des surfaces irradiées et des phénomènes d'ionisation au voisinage de celles-ci en raison des vides imparfaits de l'époque.

5. Il faudrait inclure ici le rayonnement de la radioactivité dont l'histoire est indissociable de celles des rayons X [Wheaton 2008].

dû être soumis au même processus énergétique. Pour résoudre cette anomalie, Thomson avait même réactivé d'anciennes idées sur la nature de la lumière qu'il avait émises dès 1893 et qu'il développa dans les leçons qu'il donna à l'université de Yale au printemps 1903 [McCormmach 1967]. Dans ces leçons, il insistait sur le fait que si les tubes de force⁶ que Faraday avait associés à la description des propriétés du champ électromagnétique étaient divisibles à l'infini en raison de la structure continue des équations de Maxwell, l'existence naturelle d'une charge élémentaire insécable (l'électron) devait entraîner, selon lui, l'existence de tubes élémentaires. Dès lors, si ces tubes devaient être pourvus d'une réalité physique, ils devenaient l'analogue des molécules de la théorie cinétique des gaz, révélant une structure discontinue du champ. Examinant le comportement d'un tel tube lors de la brusque décélération d'une particule chargée, Thomson en déduisait l'émission d'un pulse électromagnétique très intense associé à la propagation d'un ébranlement transverse le long du tube. Un mouvement périodique de va-et-vient de la charge entraînait alors l'émission d'une onde électromagnétique ; mais les tubes de force étant en nombre discret, le front de l'onde lumineuse ainsi constituée, au lieu de produire une illumination continue comme le voulait la théorie ondulatoire classique, s'apparentait plutôt à une série de spots lumineux de forte intensité sur un fond noir. C'est cette répartition granulaire de l'énergie électromagnétique que Thomson mettait en avant pour comprendre le faible taux d'ionisation des gaz par les rayons X : seuls les atomes situés sur le trajet de ces pulses étaient susceptibles d'être ionisés.

Selon cette approche, les rayons X étaient donc de la lumière, distincte seulement de la lumière ordinaire en ce que la taille des pulses qui les constituaient devait être beaucoup plus faible : en effet, d'une part le calcul montrait que l'énergie contenue dans un pulse était en proportion inverse de sa taille, et d'autre part les rayonnements les plus pénétrants dans la matière, tel les rayons X, devaient être les plus énergétiques, car produits par des électrons de haute énergie cinétique.

Les thèses de Thomson se voulaient encore plus ou moins académiques jusqu'en 1906. Ce dernier s'était même conformé à l'hypothèse de Lenard à l'occasion de la seconde édition largement révisée de son livre, *Conduction of Electricity through Gases*, qui prenait en compte les résultats expérimentaux accumulés entre 1902 et 1906 sur les propriétés ionisantes des rayons X et des rayons ultra-violets. Thomson y étendait alors l'hypothèse de Lenard aux rayons X tout en montrant par des arguments d'ordre de grandeur que la théorie des impulsions sphériques ne pouvait pas expliquer les vitesses des photoélectrons générés par ces rayons : leurs valeurs mesurées étaient bien trop importantes pour qu'elles puissent être dues à l'énergie électromagnétique contenue dans un élément de volume d'une telle impulsion.

C'est dans le courant de l'année 1907, précisément à l'époque où Jakob Kunz était à Cambridge, que Thomson commença d'argumenter plus profon-

6. Ces tubes de force sont en lien avec nos actuelles lignes de champ.

dément sur la consistance de sa propre théorie des pulses face aux données expérimentales [Wheaton 2008], [Thomson 1907] : non seulement elle expliquait de façon naturelle le faible taux d'ionisation des gaz, mais il devenait évident également d'en déduire que la vitesse acquise par un électron émis sous l'impulsion d'un pulse serait indépendante du nombre de ces pulses incidents et donc de l'intensité lumineuse, ce qui était bien le résultat marquant des expériences photoélectriques de Lenard ; résultat qui venait tout juste d'être confirmé pour le cas des rayons X par Innes, un étudiant de Thomson.

En outre, si la taille des pulses reflétait (d'une façon ou d'une autre) l'équivalent d'une longueur d'onde, l'énergie qu'ils contenaient devait alors augmenter avec la fréquence du rayonnement utilisé⁷, et il devenait tout aussi clair que la vitesse acquise par un photoélectron devait augmenter continûment avec la fréquence excitatrice si une part au moins de cette énergie lumineuse lui était transmise. À l'appui de ce raisonnement, Thomson pouvait maintenant citer les résultats qu'Innes avait obtenus dans le domaine des rayons X, mais aussi ceux que venait d'obtenir Erich Ladenburg à Berlin dans le domaine de l'ultra-violet où la notion de fréquence n'était pas sujette à caution. Les expériences de Ladenburg confirmaient l'existence d'une relation continue et croissante entre vitesse et fréquence, mais pour Thomson, ces résultats affaiblissaient l'hypothèse de Lenard plus qu'ils ne la confortaient, car ils nécessitaient, selon lui, l'existence d'un éventail irraisonnable de trajectoires électroniques au sein d'un atome de même espèce, éventail continu qu'il fallait par surcroît compléter avec d'autres associés à des énergies radicalement différentes que les rayons X mettaient en évidence. Face à cette profusion de trajectoires que la régularité des spectres de raies semblait contredire, Thomson préférait donc voir l'origine des vitesses des électrons photoémis comme le résultat d'un échange énergétique entre matière et lumière, lumière qu'il fallait imaginer sous la forme de pulses « thomsoniens » [Wheaton 2008, 136–138].

Ladenburg quant à lui avait interprété ses expériences dans le cadre de l'hypothèse de Lenard. Ses travaux avaient consisté en une étude de la photo-électricité des métaux Cu, Zn et Pt au cours de laquelle il avait pu mesurer la vitesse maximale (v_m) des électrons produits par différentes fréquences lumineuses (ν) bien déterminées. Pour chacun des trois métaux, il obtenait une loi $v_m(\nu)$ qui, apparemment, croissait avec ν de façon linéaire. Attendu que les mouvements orbitaux des électrons étaient généralement pensés comme des oscillations harmoniques, à l'image des oscillateurs résonants utilisés par les thermodynamiciens qui étudiaient le rayonnement du corps noir, ce résultat paraissait presque naturel [Katzir 2006]. Mais, vers la fin de cette même année 1907, Abraham Ioffe, à Saint-Petersbourg, publiait une note critique des conclusions de Ladenburg en faisant remarquer que la plage de longueurs d'onde explorée, 59 nm, était trop limitée et que les données s'accordaient tout aussi bien avec une parabole, révélant plutôt une loi linéaire entre *le carré* de

7. La relation entre fréquence (ν) et longueur d'onde (λ) est : $\lambda = c/\nu$, où c est la vitesse de la lumière.

la vitesse et la fréquence. Ioffe attirait alors l'attention sur le fait qu'une telle relation avait été prédite par Albert Einstein, deux ans auparavant, dans le cadre d'une théorie alternative à l'hypothèse de Lenard.

Cette théorie était intimement liée à la solution que Planck avait apportée au problème du rayonnement du corps noir en quantifiant formellement l'énergie des oscillateurs résonants impliqués dans ce rayonnement. Einstein, dans les articles qu'il publia entre 1905 et 1907, avait alors émis l'idée que, dans les processus énergétiques impliquant la transformation (effet photoélectrique) ou la production (corps noir) d'une onde lumineuse de fréquence ν , le rayonnement se comporte comme s'il était constitué de quanta d'énergie lumineuse, indépendants les uns des autres et non fractionnables, de valeur $h\nu$, où h était la constante introduite par Planck dans son calcul de 1900. En 1905 [Einstein 1905], Einstein avait appliqué son point de vue à l'effet photoélectrique en effectuant le bilan énergétique suivant, qui l'affranchissait de toute question regardant l'origine des photoélectrons et la structure intime de l'atome : l'énergie cédée par un quantum de lumière à un électron évoluant au sein du corps irradié concourt à son extraction du corps en question et à lui communiquer une certaine énergie cinétique. Ainsi, en notations modernes et en appelant W_S (notre actuel « travail de sortie ») le travail nécessaire pour extraire du corps les électrons les plus rapides observés expérimentalement, ce bilan prend la forme :

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + W_S.$$

Dans les expériences de mesure de v_m que Lenard avait inaugurées, les électrons sont photoémis par une cathode irradiée et le courant photoélectrique est collecté par une anode réceptrice, l'ensemble étant placé sous vide et relié aux bornes d'un générateur de tension. On obtient v_m en ajustant la différence de potentiel entre les deux électrodes à une certaine valeur, V , tout juste capable d'empêcher le courant photoélectrique de s'écouler : l'énergie électrique mise en jeu contrecarre alors exactement l'énergie cinétique maximale des électrons, et on peut écrire, si e est la charge portée par un électron⁸ :

$$eV = \frac{1}{2}mv_m^2.$$

Einstein prévoyait donc une dépendance linéaire de V en fonction de la fréquence excitatrice ν , et non pas une relation parabolique comme le suggérait la thèse classique de l'émission résonante appliquée à des électrons supposés réaliser des oscillations harmoniques. En outre, le lien entre le problème du corps noir et celui de l'effet photoélectrique était vérifiable expérimentalement en estimant la pente de la droite $V(\nu)$ qui donne accès à la constante h . Enfin, même si Einstein n'en disait rien, sa relation rendait naturellement compte de l'existence d'une fréquence seuil, ν_S , (telle que $h\nu_S = W_S$) en dessous de

8. On suppose ici que l'anode et la cathode sont formées du même matériau, sans quoi il faudrait tenir compte aussi de la différence de potentiels de contact entre les deux électrodes.

laquelle l'effet photoélectrique n'avait plus lieu d'être, ce que les nombreux travaux expérimentaux de Elster et Geitel à Heidelberg avaient dévoilé tout au long des années 1890, mais qui ne serait attentivement exploité par les « photoélectriciens » qui allaient se préoccuper de la loi $V(\nu)$ que vers 1912 [Richardson & Compton 1912].

La communauté physicienne, du moins la plupart des personnages les plus connus, prit une attitude expectative, tant vis-à-vis des conceptions d'Einstein que de celles de Thomson dont on connaissait par ailleurs la grande aptitude à proposer des théories diverses et variées [McCormmach 1967], [Ramunni 1981]. Bien que très différentes⁹, on rattachait ces deux thèses aux théories corpusculaires de la lumière dont on ne connaissait que trop bien la déficience vis-à-vis des phénomènes d'interférence et de diffraction, ce que les deux auteurs passaient plus ou moins sous silence. On se fia donc en général à l'hypothèse de Lenard¹⁰ qui avait le grand avantage de ne pas toucher à la conception si bien établie de la nature ondulatoire de la lumière.

Toutefois, le raisonnement énergétique d'Einstein et l'aspect prédictif de ses hypothèses ne laissèrent pas indifférent, surtout après que Ioffe eut montré que les résultats de Ladenburg fournissaient une valeur de h pertinente (en moyenne $3 \times 10^{-34} \text{ J.s}$) comparée à la valeur annoncée par Planck ($6.55 \times 10^{-34} \text{ J.s}$). Aussi, dans les quelques années qui suivirent l'année 1907, et alors que l'hypothèse des quanta gagnait en crédibilité, la plupart des théoriciens influents optèrent plutôt pour la relation linéaire proposée par Einstein qu'ils tentèrent de reproduire (en omettant W_S en général) moyennant l'introduction d'hypothèses de plus en plus fines – voire radicales, en vue d'introduire la constante h – sur le mouvement des électrons au sein des corps et la structure de l'atome; c'est ce que firent, par exemple, Haas vers 1910 (soutenu par Lorentz, son beau-père), ainsi que Thomson la même année¹¹, puis en 1913, ou encore Sommerfeld en 1911, qui était déjà sur la voie de la mécanique des quanta [Stuewer 1970].

De son côté, Owen Richardson, à Princeton, ancien étudiant de Thomson et futur détracteur des thèses de Kunz, développait, entre 1911 et 1914, une théorie phénoménologique de l'effet photoélectrique qui faisait suite à ses travaux sur l'émission thermoelectronique basés sur la thermodynamique statistique appliquée aux électrons dans les métaux [Katzir 2006]. Il retrouvait ainsi, de façon classique, la relation linéaire proposée par Einstein en se servant de la loi de Wien pour le rayonnement du corps noir afin d'introduire la constante h .

9. En somme, Einstein propose une vision discontinue de l'énergie cédée par le champ électromagnétique, tandis que Thomson propose une vision discontinue du champ sans remettre en cause la continuité des échanges énergétiques.

10. L'hypothèse de Lenard fut peu à peu abandonnée après que Lenard lui-même et Ramsauer, en 1910-1911, eurent montré expérimentalement que l'émission de photoélectrons dans les gaz était fortement corrélée à l'absorption de la lumière ultraviolette par les atomes photoémetteurs [Wheaton 2008, 177].

11. Sur les raisons du changement d'attitude de Thomson, voir [McCormmach 1967].

Cependant, la forme de la loi $V(\nu)$ réclamait un apport expérimental plus robuste que les expériences controversées de Ladenburg. Albert Hull, en 1909, publiait des données sur le carbone et se prononçait en faveur d'une loi parabolique [Allen 1913]. Mais ses conclusions, basées sur trois points expérimentaux répartis sur une plage de 48 nm dans l'ultra-violet, étaient encore plus critiquables que celles de Ladenburg. Ce sont les mesures photoélectriques de Jakob Kunz qui furent les premières à élargir significativement le domaine de longueurs d'onde étudiées. Et pendant trois ans, de 1909 à 1911, Kunz fut le seul à publier des courbes expérimentales $V(\nu)$. Pour lui, les expériences de Lenard (vitesse des électrons indépendante de l'intensité lumineuse) associées à celles de Ladenburg (relation continue entre fréquence excitatrice et vitesse des électrons) trouvaient leur explication la plus naturelle dans une conception granulaire de la lumière à la Thomson [Kunz 1909b]. Il allait donc interpréter ses résultats expérimentaux dans ce sens en développant ses propres vues sur les pulses électromagnétiques pour aboutir à une loi prédictive $V(\nu)$ à propos de laquelle Thomson ne s'était exprimé que qualitativement. Les cheminement de Kunz pour aboutir à une formule de l'énergie contenue au sein de chaque pulse méritent probablement une analyse plus approfondie que celle qui va suivre, mais elle suffira néanmoins à dévoiler l'intrication des réflexions de Kunz à cette époque dans sa volonté d'englober dans un même point de vue l'origine et la nature de la lumière, le rayonnement du corps noir et les lois de l'effet photoélectrique. Le compte-rendu qui suit insistera plus particulièrement sur le traitement énergétique que Kunz réserve à l'effet photoélectrique, sur l'évolution de ses idées et des mesures que lui et Cornelius effectuèrent entre 1909 et 1912, et sur la façon dont Richardson et son étudiant, Karl Compton, mirent officiellement fin aux thèses de Kunz grâce en particulier à leur maîtrise du terme W_S figurant dans l'équation d'Einstein.

4 L'évolution des idées et des mesures photoélectriques de Jakob Kunz (et de David W. Cornelius)

4.1 L'article de 1909

Les premiers résultats expérimentaux que Kunz obtient avec l'aide des étudiants de Ann Arbor sont publiés en août et septembre 1909 [Kunz 1909a,b]. C'est dans l'article principal de septembre que le physicien développe sa théorie de l'effet photoélectrique. Il reprend d'abord pas à pas les idées et les démonstrations que Thomson avait développées dans ses cours pour obtenir l'expression de la quantité d'énergie élémentaire rayonnée par un électron décéléré pendant une durée infinitésimale. À partir de cette expression, Kunz entreprend le calcul de l'énergie E contenue dans un pulse électromagnétique généré par l'électron, qu'il imagine osciller pendant une période assimilée à la

durée de sa « collision » avec un atome. Dans la courte démonstration qui s'ensuit, où il s'agit d'intégrer l'expression de Thomson, Kunz utilise l'hypothèse que son maître à penser avait déjà émise pour parvenir aux lois du rayonnement du corps noir par ce biais (la loi de Wien), à savoir que la durée de la collision se doit d'être inversement proportionnelle à la température absolue du corps noir (ou encore à la vitesse quadratique moyenne de l'électron). C'est une hypothèse que Kunz connaît bien, car en cette même année 1909, il vient de publier [Kunz 1909c] une étude sur le corps noir, calquée là encore sur les cheminements de Thomson.

Pour finir son calcul, Kunz identifie, comme il est de coutume à l'époque, la période d'oscillation de l'électron avec celle de la vibration lumineuse (rayon X ou lumière naturelle) ainsi générée. Ce faisant, l'énergie disponible au sein du pulse se révèle être proportionnelle au carré de la fréquence lumineuse, $E = k\nu^2$, que Kunz va alors poser comme formule alternative, ou plutôt complémentaire¹², à celle initiée par Planck dans son étude du corps noir, $E = h\nu$.

Lorsqu'il se tourne vers le phénomène photoélectrique, Kunz, comme Einstein, adopte un traitement énergétique : lors de l'interaction entre un pulse électromagnétique et un électron situé au sein du corps irradié, toute l'énergie contenue dans le pulse est supposée être cédée à l'électron. Dans le mouvement d'éjection qui s'ensuit, l'électron émet un rayonnement secondaire (à l'image des rayons X produits lors de la décélération des rayons cathodiques sur la matière) jusqu'à sortir de la zone¹³ chargée positivement qu'il laisse derrière lui. Kunz pose alors que l'énergie cinétique de cet électron est une fraction α , caractéristique de chaque élément, de l'énergie initialement contenue dans le pulse incident. Enfin, au cours de son trajet vers la surface du corps irradié, cet électron diffuse sur les atomes ou molécules qui l'entourent et perd une partie w de son énergie cinétique, de sorte que le bilan énergétique de Kunz s'exprime par la formule :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \alpha k\nu^2 - w,$$

où v est la vitesse de l'électron à sa sortie du corps. Selon cette ligne de pensée, Kunz considère que la « théorie de Planck », ainsi qu'il la dénomme, lorsqu'elle est appliquée à l'effet photoélectrique, doit mener à l'équation alternative :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \alpha h\nu - w.$$

12. Pour Kunz en effet, cette alternative n'est pas en contradiction avec la formule de Planck qu'il faut restreindre, selon lui, au cadre du corps noir : il s'en expliquera en 1910 en présumant que les oscillateurs résonants de Planck n'ont qu'un lien indirect avec le mouvement des électrons au sein du métal et donc avec l'énergie contenue dans un pulse de lumière [Kunz 1910b].

13. Kunz assimile cette zone à l'atome s'il s'agit d'un pulse X. Il reste imprécis si le pulse incident est un pulse de lumière naturelle, mais la logique veut que l'on pense à une molécule ou à un élément de volume au sein duquel évoluait initialement l'électron.

Ce bilan appelle plusieurs remarques. D'abord, Kunz se range du côté des novateurs en admettant l'indivisibilité de l'échange énergétique entre l'électron et le pulse « thomsonien ». Thomson lui-même ne le suit pas sur ce terrain lorsqu'il se penche sur les idées quantiques à partir de cette année 1909 [McCormach 1967] : pour lui, comme pour les tenants des thèses classiques, si l'indivisibilité il doit y avoir, elle se trouve dans les constituants élémentaires comme l'électron, voire les tubes de Faraday, mais pas dans les quantités énergétiques qu'ils sont susceptibles de s'échanger.

Cependant, si l'équation proposée par Kunz dans sa version « théorie de Planck » diffère radicalement de celle d'Einstein, c'est qu'en réalisant son bilan, ce dernier avait admis que les photoélectrons les plus rapides proviennent du voisinage immédiat de la surface du corps irradié, les autres perdant effectivement une partie de leur énergie cinétique au cours de leur trajet vers la surface [Einstein 1905]. Le bilan d'Einstein ne contient donc pas de terme de pertes (w) et ne se préoccupe que du processus de transfert énergétique entre le quanta de lumière ($h\nu$) et l'électron : énergie cinétique + travail d'extraction W ¹⁴. Kunz quant à lui s'y prend en deux temps pour établir son équation : processus de transfert, puis voyage vers la surface. Or, du processus de transfert, Kunz ne retient que le coefficient α . Ainsi, s'il faut faire un lien entre ce coefficient et le bilan d'Einstein, il faut écrire :

$$\alpha h\nu = h\nu - W \Leftrightarrow \alpha = 1 - \frac{W}{h\nu}.$$

Et Kunz de considérer α comme un coefficient propre à la nature du corps irradié sans le faire dépendre de ν .

Les raisonnements de Kunz pour établir ses équations bilan ont pu lui être suggérés par les résultats de Ladenburg qui semblaient impliquer l'existence d'un coefficient α différent devant le terme $h\nu^2$ (ou $h\nu$) pour chacun des trois métaux étudiés. Par ailleurs, il semble que la démarche de Kunz consistant à insérer un terme de pertes w dans ces équations bilan ait été guidée par sa connaissance des théories de Drude et Lorentz (ou encore Thomson en 1907) pour expliquer la conduction électrique dans les métaux, où la loi d'Ohm tire son origine de la diffusion inélastique des électrons libres au sein du métal. Kunz avait en effet rédigé un mémoire à propos de ces théories corpusculaires appliquées aux effets thermoélectriques peu avant son départ de Cambridge pour les États-Unis [Kunz 1908]. C'est donc un sujet qui lui est familier, et à suivre rigoureusement le bilan qu'il propose, il s'ensuit que la notion de fréquence seuil apparaît intimement liée à w , et qu'il faille conclure à l'impossibilité pour un électron de se déplacer au sein du métal sans avoir subi une diffusion inélastique minimale que caractériserait cette fréquence seuil... Quoi qu'il en soit, Kunz ne rend jamais nulle la quantité w dans son exposé : pour

14. Einstein précise bien dans son article de 1905 que si l'électron doit être arraché par la lumière à une molécule, il suffit d'ajouter ce nouveau travail d'extraction à celui (de toute façon) nécessaire pour quitter le corps irradié.

lui, la vitesse maximale, v_m , que peut atteindre un électron est celle qu'il acquiert immédiatement après son interaction avec le pulse électromagnétique. Et pour relier cette vitesse à la fréquence du rayonnement incident, Kunz est amené à négliger w devant les termes $ak\nu^2$ ou $ah\nu$ de ses deux équations bilan. Il établit ainsi deux relations alternatives entre v_m et ν qu'il se propose de départager expérimentalement.

Pour mesurer v_m , Kunz utilise le fait qu'au cours du processus photoélectrique, le métal irradié, s'il est isolé électriquement, se charge positivement. À l'équilibre photoélectrique, le métal est ainsi porté au potentiel V devenu suffisant pour empêcher les électrons les plus rapides de s'échapper. Kunz convient donc de mesurer directement ce potentiel plutôt que d'employer la méthode de Lenard.

Afin d'obtenir une plage de longueur d'ondes conséquente, Kunz a choisi de travailler avec un amalgame liquide de sodium (Na)-potassium (K) connu pour sa photosensibilité à la lumière visible depuis les travaux de Elster et Geitel en 1894. L'alliage est élaboré et purifié *in situ* par Kunz lui-même, puis placé dans un tube de verre scellé sous vide auquel sont soudées deux électrodes en platine se faisant face. L'alliage NaK mouille ainsi l'électrode E_1 (figure 1) qui est isolée électriquement et connectée à une paire de quadrants d'un électromètre à haute sensibilité, de type Dolezalek (mis au point en 1896). L'électrode E_2 est connectée à la terre et à la seconde paire de quadrants de l'électromètre¹⁵.

La source de lumière est produite par un arc électrique placé au foyer d'une lentille. Le faisceau blanc obtenu est décomposé en ses différentes longueurs d'onde grâce à un système de prismes (P_1 , P_2) qui le dirigent vers un écran transparent (L_2) préalablement calibré à l'aide des principales raies spectrales des éléments Li, Na, Hg et Ag. Le tube contenant l'alliage est enfermé dans une boîte en bois, bardée d'étain et mise à la terre, qui peut coulisser le long de l'écran L_2 . La boîte est munie d'une fenêtre métallique qui, lorsqu'elle est ouverte, permet d'irradier l'alliage avec une lumière de longueur d'onde choisie. L'électromètre dévie alors jusqu'à une déflexion maximale, proportionnelle à V .

Avec ce dispositif, Kunz obtient la valeur des déflexions maximales pour 11 longueurs d'onde lumineuses réparties sur une plage de 172 nm allant du violet à l'orange, gagnant ainsi un facteur 3 sur l'intervalle exploré par Ladenburg dans l'ultra-violet (figure 2). De cette première série de mesures, Kunz déduit d'abord que :

The potential difference between the electrodes of the vacuum tube appears to be proportional to the wave-length and decreases with increasing wave-length. [Kunz 1909b, 227]

15. Kunz se place ainsi dans les conditions décrites par Einstein pour établir son équation bilan. Par ailleurs, son dispositif est plus complet que la description qui en est faite ici (possibilité de varier la distance entre les deux électrodes, existence d'un commutateur inversant les polarités de l'électromètre...).

FIGURE 1 – Schéma de principe du dispositif expérimental utilisé par Kunz. Figure adaptée avec autorisation de « On the Photoelectric Effect of Sodium-potassium Alloy and its Bearing on the Structure of the Ether », *Physical Review* (Series I), 29, 212–228, [Kunz 1909b]. ©1909 The American Physical Society.

À l'appui de cette affirmation, qui implique clairement une relation du type $V \propto 1/\nu$ (à une constante additive près), il présente une courbe où les déflexions de l'électromètre en fonction des différentes longueurs d'onde utilisées s'ajustent effectivement avec une relation linéaire, excepté toutefois vers l'orange. Dans ce domaine en effet, les déflexions observées par Kunz sont non nulles mais faibles, irrégulières, et dépendent en partie d'un échauffement de l'appareillage. Rejetant ces données douteuses, il annonce alors sans transition :

So far as these preliminary experiments go they seem to indicate that [...] the kinetic energy is proportional to the frequency of the incident light. [Kunz 1909b, 227]

Cette étrange conclusion, où les valeurs expérimentales de V apparaissent dépendre linéairement de ν et de $\frac{1}{\nu}$ tout à la fois – ce que l'on peut empiriquement vérifier grâce au tableau de données que nous a laissé Kunz – ne peut s'expliquer que parce que la plage de longueurs d'onde explorée est encore trop faible au regard de la dispersion des points expérimentaux. À ce compte, une autre puissance de ν fonctionnerait tout aussi bien. Mais Kunz n'en dit rien. Il semble bien que ce soit l'allure visuelle de ses données qui le détermine à se prononcer prudemment en faveur de « la théorie de Planck », laissant la lectrice ou le lecteur dans l'expectative, face à un article où l'auteur développe une théorie qui ne semble pas confirmée par une expérience, somme toute encore incertaine...

Ne pouvant pas déterminer une valeur expérimentale de h en raison de la présence du coefficient α dans ses équations, Kunz termine son exposé par une estimation de ce coefficient pour une valeur spéciale de V en appliquant la « théorie de Planck » sous la forme : $\alpha h \nu = eV$, où le terme de pertes a donc été négligé. Il trouve ainsi $\alpha = 0.37$, après avoir pris les valeurs de l'époque : $h = 6.5 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ et $e = 1.55 \times 10^{-19} \text{ C}$.

FIGURE 2 – Les données expérimentales de Kunz (1909-1911). On peut regarder la figure en rasant pour mieux apprécier l’infléchissement de ces données vers les hautes fréquences. En traits pointillés : ajustement réalisé par Kunz en 1910 selon sa loi en ν^2 . En trait fin : ajustement linéaire actuel des mêmes données (voir texte). En trait plein : la droite de « Planck-Einstein » attendue pour NaK (avec $W_S = 2.3\text{ eV}$ et $h/e = 4.13\text{ J.s.C}^{-1}$). Pour la clarté de la figure, une seule série des données de 1910 est représentée. Les données de 1911 sont scindées en deux groupes selon la lampe spectrale utilisée (Cd ou Zn) [Kunz 1909b].

En fait, ce calcul de Kunz sous-estime largement la valeur réelle de la pente de la droite $V(\nu)$ sur laquelle peuvent s'ajuster ses points expérimentaux, car le terme constant, qui précisément n'est pas négligeable, joue un grand rôle dans la détermination de cette pente. Il est bien sûr possible aujourd'hui de réaliser l'ajustement linéaire que le physicien s'est empêché de faire en 1909. Selon la relation d'Einstein, la pente de cette droite fournit le rapport h/e , tandis que la constante additive correspond à la valeur de W_S exprimée en électron-Volts (eV). Avec la valeur de e précédente, la méthode des moindres carrés (exception faite des trois points défectueux rejetés par Kunz) fournit : $h \approx 5.15 \times 10^{-34}$ J.s. Pour apprécier ce résultat, il faut avoir en tête que les valeurs de h obtenues par nos étudiants avec un matériel sophistiqué ne dépassent guère 4×10^{-34} J.s en raison de difficultés chroniques, déjà inventoriées par Millikan [Millikan 1916], tendant toutes à sous-estimer les valeurs de V . Il faudra attendre les mesures de Hughes [Hughes 1913] et celles de Richardson et Compton [Richardson & Compton 1912] en 1912 pour obtenir des valeurs comparables à celle qui vient d'être obtenue. Les données de Kunz sont donc excellentes en dépit de leur ambiguïté résiduelle relativement à leur dispersion sur l'intervalle de longueurs d'onde exploré. Mais la façon dont le physicien les a exploitées ne leur donnera pas l'importance qu'elles auraient pu avoir. Millikan par exemple, dans son célèbre article [Millikan 1916], les mentionnera au passage mais insistera surtout sur les mesures de Hughes et de Richardson et Compton.

La valeur de W_S fournie par l'ajustement (1.23 eV) apparaît moins probante comparé à la valeur attendue ($W_S^{NaK} \cong 2.3$ eV, [Malov, Shebzukhov *et al.* 1974]). La non prise en compte des différences de potentiels de contact entre les électrodes ont souvent été à l'origine de résultats contradictoires relativement à ces valeurs expérimentales de W_S [Millikan 1916]. Mais le montage de Kunz, qui consiste à mesurer V directement, semble à l'abri de ces difficultés. On peut penser ici à l'adsorption ou la chimisorption de molécules résiduelles (formation d'un hydrure par exemple) à la surface de NaK dont la conséquence serait d'abaisser W_S [Hughes & DuBridge 1932, 73], ou bien encore, en se fondant sur les futurs résultats que Kunz va présenter en 1910, se tourner vers un problème d'isolation électrique, ce qui a l'avantage d'expliquer les valeurs sous-estimées de W_S et de h tout à la fois : en 1909, Kunz signale en effet l'existence d'un défaut d'isolation de l'électrode E_1 au sein de son montage expérimental. Ce défaut entraîne une fuite électrique qui donne lieu à des mesures de V sous-estimées qu'il prétend prendre en compte facilement sans plus d'explications. Un an plus tard, il prendra la peine de rapporter en détail ses efforts pour limiter ce défaut d'isolation qu'il réussira cette fois à quantifier. Il n'est donc pas impossible que les mesures de 1909 aient été entachées de corrections imprécises.

4.2 Les mesures de 1910

En novembre 1910 [Kunz 1910a], Kunz présente deux nouvelles séries de mesures (figure 2) réalisées avec le même dispositif qu'il a singulièrement amélioré après son transfert dans le tout nouveau laboratoire de physique de Urbana Champaign. Ces données bénéficient non seulement d'un sérieux effort concernant le vide résiduel et l'isolation électrique, mais aussi d'une amélioration de la sensibilité de l'électromètre. La plage de longueurs d'onde explorée est toutefois un peu moins étendue (154 nm) que précédemment en raison des difficultés expérimentales que Kunz rencontre encore vers l'orange.

Lorsqu'il publie ces nouveaux résultats, Kunz a quelque peu révisé ses idées sur le phénomène photoélectrique. Il écrit maintenant son équation bilan sous la forme : $V = av^2 + b$, sans plus discuter du lien entre a et sa constante k . En revanche, la constante b est cette fois clairement associée à un travail d'extraction¹⁶ et il n'est plus question du terme de pertes w . Cette attitude changeante et peu loquace de Kunz vis-à-vis de cette constante exprime probablement les hésitations de l'époque sur le sens et les valeurs numériques qu'il fallait donner à l'expression « travail d'extraction » lorsque l'on considérait l'effet photoélectrique opérant sur les métaux, en raison sans doute du problème de l'origine des photoélectrons mais aussi en raison des effets de « fatigue » observés et des problèmes récurrents de différences de potentiels de contacts qui induisaient de grandes disparités expérimentales au point de faire douter de la notion de fréquence seuil [Millikan 1916, 356]. Il est par ailleurs plausible que le revirement de Kunz ait été impulsé par sa rencontre avec ses nouveaux collègues américains à l'occasion du congrès annuel de l'American Physical Society qui se tint à Boston fin décembre 1909. Dans son article, Kunz allait en effet citer à son avantage (voir plus loin) la contribution faite à ce congrès par Millikan [Millikan 1910]¹⁷, qui travaillait avec son équipe sur l'effet photoélectrique depuis 1905. D'autre part, il est certain que Kunz a connaissance des travaux d'Einstein à cette date puisqu'il fait état du principe de relativité dans son introduction; principe qu'il adopte pour supporter la théorie des pulses en raison de la disparition de la notion d'éther qui, en sus des propriétés singulières qu'on lui avait attribuées, se devait d'être structuré dans ce point de vue. Mais il reste que Kunz ne cite pas Einstein et qu'il persiste à vouloir confronter la « théorie de Planck » avec la sienne.

Du tableau de données, qu'il accompagne d'un graphe où la grandeur V est tracée soit en fonction de la fréquence lumineuse, soit en fonction de son carré, Kunz conclut cette fois :

16. Les valeurs de b doivent donc se comparer à celles de W_S , au signe près.

17. Millikan avait alors rapporté que les métaux placés sous vide et irradiés par des rayons ultra-violets pendant plusieurs semaines présentaient des potentiels photoélectriques (V) dix à trente fois plus élevés que ceux obtenus au préalable. Cet effet s'avérera être dû en grande partie à des perturbations électromagnétiques générées par les sources de lumière, l'une des origines possibles aux défauts des mesures de Kunz (voir la note 25).

It appears that the potential difference acquired by the potassium-sodium alloy is proportional to the square of the frequency of the light. [Kunz 1910a, 540]

À strictement parler, Kunz a raison : les données qu'il obtient s'incurvent doucement vers les hautes fréquences, ce qui leur confère effectivement une allure parabolique (figure 2). Porté par ces résultats, il a rédigé dans le même temps un article de fond [Kunz 1910b] dans lequel il commente la théorie des pulses électromagnétiques et ses conséquences relativement au problème du corps noir, aux hypothèses relativistes, à l'expérience de Michelson et Morley, à l'effet Doppler et aux phénomènes d'interférence. Cet article, paru en novembre 1910 également, est daté du 14 juillet par Kunz. Il y mentionne ses expériences photoélectriques avec force :

the experiments made on the photoelectric effect of sodium-potassium alloy, made by the author, show that the kinetic energy of the electrons emitted by this alloy is for a considerable range proportional to the square of the frequency of the incident light. [Kunz 1910b, 314]

Il faut pourtant bien admettre aujourd'hui que Kunz a tort : la plage de fréquences explorées, au regard de la faible courbure qu'offrent les données expérimentales, n'est, de fait, pas si considérable, et le doute est encore permis entre les deux théories (figure 2)... Mais Kunz ne suit pas cette voie : il a manifestement confiance dans la fiabilité de son dispositif expérimental et, pour lui, les données témoignent naturellement d'une loi parabolique. Poursuivant cette logique, Kunz en déduit les valeurs de a et b qu'il compare ensuite avec celles qu'il obtient au ré-examen des expériences de Ladenburg et de Hull. Dans les deux cas il obtient des valeurs de a dix fois plus faibles que la sienne, mais ce constat n'infléchit pas sa position. Au contraire, il explique rationnellement ces valeurs très différentes par le fait que les potentiels obtenus par les deux expérimentateurs s'avèrent bien plus faibles que ceux qu'il a mesurés sur NaK, à l'instar de ceux qu'obtient Millikan lorsque les métaux sont soumis à une irradiation sous vide durant plusieurs semaines [Millikan 1910] (voir la note 17). Millikan avait alors interprété ses résultats par l'existence d'un film gazeux adsorbé à la surface des métaux que le rayonnement ultra-violet parvenait à éliminer. Par ce moyen, Kunz suggérerait donc (très évasivement, car son article n'en dit rien) que la constante a dépende grandement de l'état de surface des échantillons.

Les valeurs de b que Kunz détermine sont quant à elles incohérentes. Et c'est précisément cette anomalie qui va s'avérer cruciale lorsque les thèses de Kunz vont passer au crible de la critique en 1913. Si la valeur qu'il obtient pour l'alliage NaK ($b = -0.714\text{ eV}$) peut paraître acceptable pour l'époque, celles qu'il déduit des données de Ladenburg et de Hull ne le sont plus : elles avoisinent le dixième ou le centième d'eV, c'est-à-dire un voire deux ordres

de grandeur en dessous des valeurs attendues¹⁸, et prennent des valeurs positives, indiquant par là que les surfaces utilisées par les deux hommes devraient émettre spontanément des électrons... Mais Kunz se tait sur ce dernier point : il se contente de constater la petitesse de ces valeurs et d'argumenter sur la grande dépendance de b relativement à l'état de surface de l'échantillon utilisé.

L'ajustement linéaire des données $V(\nu)$ que nous laisse Kunz force pourtant l'admiration envers le travail expérimental qu'il réalise (figure 2) : la méthode des moindres carrés fournit maintenant, pour les deux séries de valeurs : $h \approx 7.50 \times 10^{-34} \text{ J.s}$, un résultat à peine supérieur de 14 % à la valeur retenue par Planck. Quant à la valeur de W_S , 2.21 eV, elle est irréprochable. L'estimation excessive de h est principalement due à l'infléchissement des données vers les hautes fréquences, ce qui suggère bien sûr la présence d'un artefact expérimental que l'on peut tenter de prendre en compte de façon radicale en supprimant ces données. On arrive ainsi à abaisser la pente ajustée de la droite $V(\nu)$ jusqu'à obtenir des valeurs de h frôlant la perfection¹⁹. Il est donc remarquable que Kunz, sur la base de données encore meilleures (au sens de la relation linéaire en fréquence) que celles de 1909, ait penché cette fois en faveur de sa propre théorie.

4.3 Les mesures de 1911

Dans le courant de l'année 1911, Kunz est en mesure d'atteindre le domaine de l'ultra-violet grâce à une lampe spectrale qui lui permet d'élargir le domaine de longueurs d'onde étudiées à 330 nm ; un intervalle qu'aucune autre équipe n'atteindra, pas même celle de Millikan qui se restreindra à des plages voisines de 230 nm. Avec un appareillage encore « amélioré », Kunz obtient ainsi deux nouvelles séries de données réalisées sur l'alliage NaK et sur le césium qu'il publie sous forme de tableaux en septembre 1911 [Kunz 1911]. L'allure nettement incurvée des courbes $V(\nu)$ qui en résultent (figure 2) permet à Kunz de conclure à nouveau en faveur d'une dépendance en ν^2 . Le physicien persiste donc dans ses idées, mais il ne publie cette fois aucune valeur des constantes a et b , se bornant à incriminer le rôle important de l'état de surface des échantillons qui empêche, selon lui, toute conclusion définitive vis-à-vis des constantes régissant le phénomène photoélectrique. Mais à bien y regarder, cette proposition résonne comme un aveu d'impuissance car il est bien certain que le physicien s'est essayé à déterminer les valeurs de ces constantes à partir des données qu'il publie. Or, les mesures concernant NaK, lorsqu'elles sont ajustées avec la loi parabolique, donnent lieu à des valeurs de a et b presque deux fois plus faibles que celles de 1910... Tandis que celles sur le césium fournissent une valeur de

18. Valeurs que l'on obtenait souvent en calculant le travail nécessaire pour qu'un électron puisse vaincre l'attraction électrostatique d'un atome supposé sphérique.

19. La détermination de h diminue au fur et à mesure de la suppression des points à haute fréquence. On finit par obtenir $h = 6.49 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ (avec $e = 1.55 \times 10^{-19} \text{ C}$) en ne gardant que les 4 premiers points sans que la valeur de W_S ne devienne trop faible (1.86 eV).

b positive, approchant les centièmes d'eV, analogue à celles que fournissaient les résultats de Hull et de Ladenburg, mais avec maintenant une valeur de a cinq fois plus élevée... Ne trouvant donc aucune logique à la variation de ces constantes, il semble clair que Kunz n'a pu que se résoudre à invoquer le rôle crucial de l'état des surfaces irradiées, ne voyant plus que l'allure parabolique des courbes expérimentales $V(\nu)$ pour justifier sa thèse. Il fige ainsi son point de vue et préfère aller de l'avant : il poursuit son article en se préoccupant du domaine des basses fréquences où il rencontrait jusqu'alors quelques difficultés expérimentales qu'il réussit cette fois à surmonter²⁰. Puis il se tourne vers le domaine des rayons X afin de déterminer la longueur d'onde « équivalente » de ces rayons dont la nature n'est toujours pas clarifiée en 1911²¹.

Dans ce dernier article, Kunz faisait encore la remarque :

Though the positive potential increases as the square of the frequency, it was very noticeable that the parabola $V - \nu^2$ approaches in certain cases the straight line $V - \nu$, which we should expect from Planck's theory of radiation. [Kunz 1911, 211]

Ce commentaire prémonitoire, dont Kunz ne tire aucune conséquence dans son article, est confirmé par l'ajustement linéaire de ses données sur NaK qui fournit cette fois des valeurs exceptionnelles : $h \approx 6.32 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ ²² et $W_S = 2.28 \text{ eV}$. Ainsi, trois ans avant Millikan, Kunz était là encore en possession de données susceptibles de confirmer les thèses qu'il souhaitait contredire. Il faut toutefois spécifier que ces valeurs spectaculaires ne s'accordent que statistiquement avec les données de Kunz, en vertu d'une loi linéaire présumée : la droite construite avec ces paramètres semble en effet, visuellement, peu convaincante au regard des points expérimentaux, d'autant plus qu'en 1911 la méthode des moindres carrés était encore loin d'être en vogue. À l'époque, on réalisait un ajustement linéaire en traçant une droite passant visuellement au plus près des données expérimentales, et on déterminait la pente et la constante associées à l'aide de deux points particuliers situés sur cette droite. Or, les données obtenues par Kunz en 1911 se prêtent très mal à cet exercice en raison de leur infléchissement systématique. Aussi, quand bien même Kunz eût été partisan d'une relation linéaire, le tracé d'une droite dont

20. Kunz enregistre dans ce domaine l'existence d'un maximum dans la courbe $V(\nu)$ centré autour de la longueur d'onde 618 nm qui n'est sans doute pas un artefact mais qui semble être lié à l'existence d'une transition dissociative de la molécule NaK, de type « *bound-free* », répertoriée aujourd'hui autour de 620 nm .

21. Pour ce faire, Kunz mesure directement la vitesse v_m des électrons photoémis par une plaque de Zinc irradiée par le faisceau X en les soumettant à un champ magnétique. Il applique ensuite la relation $\frac{1}{2}mv_m^2 = a\nu^2 + b$ dans laquelle il néglige b . Pour s'affranchir de a , il a mesuré au préalable le potentiel V auquel est portée la plaque de Zinc lorsqu'elle est irradiée par une radiation ultra-violette de longueur d'onde connue.

22. Valeur obtenue avec $e = 1.55 \times 10^{-19} \text{ C}$. En prenant la valeur de e obtenue par Millikan en 1913 ($1.591 \times 10^{-19} \text{ C}$), on obtient $h = 6.49 \times 10^{-34} \text{ J.s}$.

la pente s'accorde si bien avec la valeur attendue de h serait plutôt passé pour un artifice heureux auprès des lecteurs critiques.

Il reste qu'un Jakob Kunz partisan d'une relation linéaire aurait sans nul doute recherché l'artefact qui tendait à faire infléchir ses données vers les hautes fréquences. Et cet hypothétique partisan, excellent expérimentateur, se serait sans doute lancé dans d'autres types « d'améliorations » de son dispositif. Il apparaît donc que l'attitude de Kunz en faveur d'une loi parabolique l'a fort probablement poussé à valider un ensemble de conditions expérimentales conformes à ses désirs : le bien-fondé de ses calculs de 1909.

4.4 Les mesures de Cornelius et les critiques de Karl Compton (1912-1913)

Après l'article de 1911, Kunz laissa le soin de poursuivre ces travaux à son étudiant, David W. Cornelius. Les expériences que ce dernier réalisa furent consignées dans un mémoire daté de mai 1912 mais qui ne parut qu'en janvier 1913 [Cornelius 1913]. Entre temps, une abondance de nouvelles mesures photoélectriques était publiée par deux groupes anglo-américains favorables à une loi linéaire en fréquence, sans toutefois supporter l'hypothèse des quanta de lumière.

Les expériences de Hughes [Hughes 1913], l'étudiant de Thomson à Cambridge, fournissaient des valeurs de h comprises entre 4.9 et $5.9 \times 10^{-34} \text{ J.s}$; valeurs qu'il interprétait à l'aide d'une théorie résonante à laquelle Thomson s'était temporairement rallié en développant un modèle exotique de l'atome où l'énergie lumineuse absorbée par l'électron était supposée être proportionnelle à la fréquence, la constante de proportionnalité dépendant de la nature de l'atome en question. Ce genre de modèle identifiait W_S au travail nécessaire pour extraire l'électron de l'atome (ou de la molécule), dont l'ordre de grandeur, quelques eV , était en phase avec les valeurs expérimentales que Hughes déduisait de la loi linéaire en fréquence (malgré des problèmes inhérents aux différences de potentiels de contact qu'il n'avait pas pris en compte).

De leur côté, Richardson et Compton publiaient des résultats expérimentaux [Richardson & Compton 1912] qu'ils interprétaient selon la propre théorie de Richardson. Leurs expériences fournissaient elles aussi des valeurs sous-estimées de h (comprises entre 3.55 et $5.85 \times 10^{-34} \text{ J.s}$) qu'ils tentaient d'expliquer par l'existence d'une couche de surface, photoélectriquement morte, ralentissant les électrons à leur sortie du métal. Ils avaient toutefois le grand avantage de donner un sens précis à la notion de travail d'extraction en se basant sur la théorie de l'émission thermoélectronique de Richardson et en la liant clairement à celle de fréquence seuil, notion empiriquement plus évidente à appréhender ; ces deux approches permettant une estimation non ambiguë des valeurs à donner à W_S , ainsi qu'allait le montrer Compton lors de sa critique des résultats de Cornelius.

Kunz était donc maintenant rattrapé par des partisans d'une relation linéaire qui faisaient preuve de raisonnements plus élaborés concernant les

énergies mises en jeu dans le processus photoélectrique que ceux que lui-même avait pu exprimer tout au long de ces trois années où il avait été seul sur la scène expérimentale. Naturellement, le point de vue qu'il s'était forgé pendant cette période eut des conséquences importantes sur la façon dont Cornelius aborda ses propres expériences. L'influence du maître fut même, on peut le dire, plutôt néfaste... Ainsi, lorsqu'il présente ses résultats, Cornelius commet d'abord une bourde qui renvoie fortement à la façon confuse dont Kunz avait analysé ses expériences de 1909 : commentant un graphique où sont portées les différences de potentiel (V) obtenues en fonction des différentes longueurs d'onde utilisées, Cornelius affirme :

The curve of Fig. 7 certainly is not a straight line as Planck's law would require... [Cornelius 1913, 22]

Erreur flagrante, puisque c'est avec la fréquence que la loi de Planck-Einstein prévoit une relation linéaire. Mais, ayant ainsi rejeté l'hypothèse $E = h\nu$, Cornelius poursuit et tente de convaincre le lecteur, la lectrice, que ses résultats sont conformes aux thèses de son inspirateur... en faisant preuve toutefois d'un parti pris trop évident, car il faut bien reconnaître que la réalité est toute autre : parmi l'ensemble des données que fournit Cornelius dans son article (5 tableaux de mesures), il n'y a guère qu'une seule série (la table II) qui présente visuellement un aspect incurvé plutôt marqué lorsque l'on porte V en fonction de la fréquence ν . Les autres séries révèlent soit des déviations manifestes à la forme parabolique, soit un aspect tout aussi bien linéaire au vu de la dispersion des points expérimentaux²³ (figure 3).

Probablement alertés par l'erreur de Cornelius et par ses conclusions qui allaient à l'encontre de leurs propres résultats, Richardson et Compton s'employèrent à examiner dans le détail ses données expérimentales. Compton publiait alors une note critique très sévère envers les conclusions de Cornelius et les thèses de Kunz [Compton 1913]. Il commençait par montrer que les données de Cornelius, du moins les meilleures d'entre elles (la table II de son article), s'accordaient globalement mieux avec une loi en ν^3 qu'avec une présupposée loi parabolique. En outre, à bien y regarder, ces mêmes données s'ajustaient de façon très raisonnable avec la loi d'« Einstein-Richardson » du côté des

23. Cornelius rencontre en fait de grandes difficultés expérimentales pour obtenir un signal photoélectrique stable au cours du temps, difficultés qu'il attribue à la réorganisation chimique des surfaces irradiées. Lorsque le signal qu'il enregistre est devenu stable (au bout de plusieurs jours), Cornelius admet que la surface est entrée dans un état permanent d'activité photoélectrique pour lequel la courbe expérimentale $V(\nu)$ obéit à la loi de Kunz.

FIGURE 3 – Un aperçu des données de Cornelius indexées selon les tables de son article original [Cornelius 1913]. Table II : ses « meilleures » données obtenues sur un film de potassium et qui furent réinterprétées par K. Compton (voir texte). Table III : film de potassium hydrogéné. Table IV (1, 2, 3) : film de césium, étude du signal au cours du temps (t) et en température (T) : 1. $t = 0$, $T = 23^{\circ}C$; 2. $t = 3h$, $T = 23^{\circ}C$; 3. $t = 7h$, $T = 0^{\circ}C$. Selon Cornelius, ces données se conformaient à la loi en ν^2 proposée par Kunz. En trait pointillé : un exemple d'ajustement des données de la Table III avec la loi de Kunz qui fournit des valeurs de b trop faibles (voir texte).

hautes fréquences²⁴ (figure 3). Ce faisant, Compton parvenait à détecter une erreur systématique s'appliquant à l'ensemble des données de Cornelius : son dispositif expérimental ne filtrait pas correctement le rayonnement incident et laissait passer des fréquences plus grandes que celle qui était supposée être sélectionnée, ce qui conférait aux données recueillies à basse fréquence une allure parabolique analogue aux prédictions de Kunz... Compton se demandait même si ce défaut n'avait pas entaché également les données que Kunz avait publiées en 1909²⁵.

Plus grave, Compton, naturellement influencé par les thèses de son mentor, mettait le doigt sur un problème récurrent : à savoir que le travail d'extraction obtenu en ajustant les données photoélectriques avec la loi de Kunz s'avérait anormalement faible. Pour démontrer son affirmation, Compton s'appuyait d'abord sur les expériences et la théorie de l'émission thermoélectronique de

24. En ajustant les données à haute fréquence de cette table II, Compton déduisit ainsi une valeur de h tout à fait acceptable ($5.7 \times 10^{-34} J.s$). Un ajustement similaire réalisé aujourd'hui sur les autres données de Cornelius fournit des valeurs nettement moins bonnes (2 à $3.7 \times 10^{-34} J.s$). Le travail de Cornelius n'échappe donc pas aux difficultés chroniques que Millikan avait relevées : vide imparfait, existence d'un photocourant inverse dû à la réflexion de la lumière incidente sur l'anode et fuites électrostatiques diverses donnent lieu à des valeurs sous-estimées de V (et donc de h).

25. Quoi qu'il en soit, les données publiées par Kunz en 1910 et 1911 ne semblent pas être sujettes à ce défaut relevé par Compton, car c'est vers les hautes fréquences que ces données s'incurvent et non pas aux basses fréquences comme celles de Cornelius. Il faut souligner au contraire la singularité des mesures de Kunz qui sont les seules à fournir des valeurs surestimées de h lorsque l'on tente de les ajuster avec une loi linéaire : même si les données de 1911 sur NaK bénéficient d'un accord statistique indéniable avec la relation d'Einstein, celles sur le césium deviennent quelque peu rédhitoires : leur ajustement linéaire entraîne la valeur $h = 8.79 \times 10^{-34} J.s$.

Quelques pistes, non exhaustives, pourraient expliquer l'origine de ce défaut expérimental : 1. Les corrections apportées par Kunz pour prendre en compte les fuites électrostatiques sont biaisées car dépendantes de la fréquence incidente utilisée. 2. Polarisation négative des parois qui entraîne une surestimation de V allant en croissant avec la fréquence incidente. 3. Problème de filtrage de la lumière incidente qui s'aggraverait en allant vers les hautes fréquences. 4. L'arc électrique générant la lumière incidente génère également des perturbations électromagnétiques qui peuvent donner lieu à des mesures de V surestimées : c'est d'ailleurs l'origine principale des potentiels importants qu'avait obtenus Millikan en 1910 (artéfact dont Kunz s'était servi pour étayer son point de vue). 5. À température finie, la queue de la distribution en énergie des électrons au sein du métal joue un rôle non négligeable sur la mesure de V (surestimation possible de plusieurs dixièmes d'eV selon l'intensité lumineuse mise en jeu)...

Il resterait encore à expliquer pourquoi les mesures de Cornelius ne semblent pas affectées par le même défaut expérimental, car si l'on se fie aux descriptions (incomplètes) figurant dans les articles originaux, il n'y a guère de différence de principe entre le dispositif de Kunz et celui de Cornelius, mise à part la façon de déterminer les longueurs d'onde utilisées (qui est à l'origine de l'erreur systématique de Cornelius détectée par Compton). Or les deux hommes obtiennent des résultats radicalement différents...

Richardson qui fournissaient des valeurs de W_S voisines de quelques eV (pour le platine en particulier [Richardson 1902]), ce qui était corroboré de façon indépendante par leurs propres expériences photoélectriques si on les interprétait à l'aide de la loi linéaire en fréquences. Par ailleurs, cet ordre de grandeur était le même que celui obtenu par le calcul habituel du travail nécessaire pour qu'un électron puisse vaincre l'attraction électrostatique de l'atome, calcul que Cornelius lui-même avait développé dans son article. Or, la plupart des valeurs que Cornelius déduisait de ses expériences à partir de la loi en ν^2 étaient si faibles – à l'image de celles que Kunz avait publiées en 1910 – qu'elles s'avéraient être équivalentes à l'énergie moyenne d'agitation thermique (quelques centièmes d' eV^{26}) pour peu que l'on accepte les lois de la thermodynamique statistique appliquée aux électrons. Ce dernier argument, tout en achevant d'invalider les interprétations de Cornelius, sonnait aussi le glas des thèses de Kunz au point que Compton pouvait écrire :

Kunz's theory therefore leads to values of $[W_S]$ which are impossible and not even of the right order of magnitude. [Compton 1913, 385]

Ainsi, c'est ce travail d'extraction W_S qui fit office de critère principal pour réfuter la loi proposée par Kunz, alors même que cette quantité énergétique était encore mal contrôlée au sein de la communauté « photoélectrique » (voire mal comprise au regard des incertitudes relatives à l'origine des électrons photoémis). Il semble même, au regard des futurs commentaires de Millikan [Millikan 1916], que ce soient précisément les articles de Richardson et Compton qui contribuèrent à populariser au sein de cette communauté l'interprétation de W_S en terme de barrière de potentiel à franchir pour qu'un électron (libre) puisse s'échapper du métal, image déjà présente chez Richardson dès les origines de sa théorie de l'émission thermoélectronique [Richardson 1902].

26. Ici, la réalité est encore plus complexe que ne le fait croire ce résumé : en fait, Cornelius présente un tableau (table VI de son article) où sont rassemblées quelques valeurs du travail d'extraction électronique déduites de travaux expérimentaux et de la loi de Kunz. La plupart d'entre elles (dont deux ont un signe positif, donc impossible) s'avèrent effectivement du même ordre de grandeur que l'énergie d'agitation thermique, calculée à partir de la formule : $\langle E \rangle = 3k_B T/2$, soit $0.038 eV$ à température ambiante. Mais lorsque Compton aborde sa discussion critique sur ce sujet, il analyse en fait les résultats de la table II de Cornelius (ses meilleures données) qui fournit $b = -0.35 eV$. Or Compton écrit :

But this value is impossibly small, being less than the average energy of thermal agitation at $23^\circ C$, which is equivalent to $0.38 [eV]$. [Compton 1913, 385]

Il apparaît donc que Compton lui-même fait une erreur d'ordre de grandeur en voulant invalider l'interprétation de Cornelius ! Malgré tout, il faut reconnaître le bien-fondé de l'argument à l'examen de la table VI de l'article de Cornelius.

4.5 Bref épilogue à propos de la relation $V(\nu)$ et des positions de Kunz

C'est en avril 1914, lors du meeting de la Société de Physique américaine à Washington, que Millikan communiqua les résultats préliminaires de sa propre équipe. Ceux-ci s'avéraient non seulement favorables à une loi linéaire, mais ils fournissaient en outre la valeur psychologique : $h = 6.561 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ ²⁷, avec une erreur annoncée inférieure à 0.5 % [Millikan 1914]. Ce résultat, accompagné de la notoriété de Millikan et des comptes-rendus détaillés que lui et son équipe publièrent dans le courant de l'année 1916 [Millikan 1916], [Kadesch & Hennings 1916], permirent de clôturer le débat²⁸ sur le bien-fondé ou non d'une relation linéaire en fréquence [Wheaton 2008, 241]. L'hypothèse des quanta lumineux n'en fut pas pour autant acceptée d'emblée : on sait qu'il fallut au moins attendre les expériences d'Arthur Compton (1923-1925) pour que la communauté physicienne, dans son ensemble, s'y conformât [Brush 2007].

Jakob Kunz, quant à lui, semble avoir admis très rapidement son échec : en mars 1914, il avait manifestement abandonné sa thèse tout en continuant de développer les idées d'une théorie de l'émission lumineuse à la Thomson, combinée aux idées relativistes, en proposant que les pulses de lumière soient doués d'une masse électromagnétique de valeur $h\nu/c^2$ [Kunz 1914]. En mai 1915, il poursuivait ses efforts dans un article [Kunz 1915] où il calculait la répartition spatiale de l'énergie électromagnétique générée par la décélération d'un électron de grande vitesse (dont Sommerfeld avait déjà montré qu'elle est ramassée dans la direction de son mouvement). À cette occasion, il résumait alors ce que beaucoup pensaient à cette époque : si la théorie ondulatoire de la lumière expliquait au mieux la diffraction, les interférences, la polarisation, elle achoppait par contre à déchiffrer les phénomènes radiatifs (corps noir, effet photoélectrique, spectres de raie...). D'un autre côté, si les théories quantiques naissantes rendaient compte de ces phénomènes au travers de bilans énergétiques, elles ne parvenaient pas à donner la moindre image des mécanismes mis en jeu comme le permettait la théorie ondulatoire. Or, suivant les préceptes de Thomson, Kunz écrivait :

It seems to be advantageous if not necessary for a theory to visualize the phenomena [Kunz 1915, 413]

27. Millikan obtint cette estimation de h en prenant pour valeur de la charge électronique : $e = 1.591 \times 10^{-19} \text{ C}$, résultat de ses dernières estimations expérimentales de 1913. Avec la valeur que Kunz utilisait ($1.55 \times 10^{-19} \text{ C}$), les données de Millikan fournissent : $h = 6.39 \times 10^{-34} \text{ J.s}$, une valeur similaire à celle qu'aurait pu obtenir Kunz en 1910 et 1911, mais avec une précision bien moindre.

28. D'autres lois de puissances avaient été proposées entre temps : Lindemann, par exemple, proposait en 1911 une loi en $\nu^{2/3}$. En outre, la loi linéaire en fréquences semblait également corroborée par les résultats obtenus dans le domaine des rayons X qui, à partir de 1912-1913, allaient être considérés au même titre que la lumière « naturelle » après la mise en évidence de leurs propriétés interférentielles.

et le calcul qu'il entreprenait dans cet article était pour lui une tentative d'identifier visuellement les pulses « thomsoniens ». Ce fut-là son dernier essai publié, mais le problème de la nature de la lumière associé à la révolution quantique de son temps ne quitta jamais ses réflexions. En 1927, ce physicien qui n'aura pas vu naître l'électrodynamique quantique, publiait un état des lieux de la physique après les contributions marquantes de Heisenberg et de Schrödinger [Kunz 1927]. Toujours dans la lignée de Thomson, il concluait :

With and without models, deep problems remain to be solved. The abyss between the continuum theory of relativity and the quantum theory still remains open, the constant h has not yet been explained or correlated with Maxwell's field theory ; the theory of light is still covered by a dark cloud. [Kunz 1927, 420]

5 Conclusion

Le point de vue proposé par Jakob Kunz entre 1909 et 1913 fut indéniablement d'une grande originalité : son adoption des idées de Thomson sur la structure granulaire de la lumière et sa quantification de l'échange énergétique entre cette lumière et la matière le rangent clairement du côté des promoteurs d'une science extraordinaire qui tente d'inclure dans une même vision le problème du corps noir et celui de l'effet photoélectrique avec, en arrière-plan, celui de la structure de l'atome.

De la sorte, la tentative de Kunz vient conforter l'opinion des historiens des sciences qui pensent que la thèse des pulses « thomsoniens » a favorablement contribué à l'ouverture des esprits sur les idées quantiques [Brush 2007], [McCormmach 1967]. L'attitude novatrice de ce physicien, quelque peu négligé par l'historiographie moderne, incite aussi à examiner plus en profondeur ses publications, ses idées et son audience. L'histoire des sciences y trouverait probablement là d'autres caractéristiques sur la réception, l'appropriation et la diffusion des idées nouvelles, ainsi que sur les mutations de l'activité des sciences physiques qui se concrétisent à cette même époque [Katzir 2013].

Par ailleurs, l'examen *a posteriori* des données expérimentales de Jakob Kunz qui vient d'être réalisé permet de dégager un exemple remarquable de la façon dont peuvent se manifester les liens existants entre expérience et idées préconçues, ainsi que l'ont maintes fois souligné des auteurs tels que Thomas Kuhn. On entrevoit ici, de façon saisissante, comment les thèses de Kunz finissent par peser dans la réalisation de ses données expérimentales jusqu'à valider (en 1911) ce qu'aujourd'hui il faut bien appeler une erreur expérimentale systématique, et comment Kunz finit par interpréter ces données dans la construction scientifique qu'il propose : les paramètres a et b dépendent grandement de l'état de surface des échantillons. La déconstruction des thèses du physicien, qui s'opère en soulignant l'incohérence des valeurs du paramètre b au regard des valeurs calculées par les méthodes habituelles et de

celles compatibles avec la toute jeune théorie de l'émission électronique, vient clore l'exemple.

Enfin, dans une vision plus globale, il faut associer les activités de Kunz aux travaux des différents groupes ou individus qui se focalisèrent sur la loi $V(\nu)$ et sur la nature de l'effet photoélectrique, ainsi que ce texte a tenté de le faire en partie. L'ensemble se présente alors comme un morceau d'histoire rempli d'une collection d'idées et d'expériences contradictoires qui ne peuvent qu'attirer l'attention sur le caractère éminemment collectif de l'entreprise scientifique. Entreprise dont les méthodes et la rationalité, si elles sont formalisables jusqu'à un certain point, reposent en dernier ressort sur la confrontation de cette collection d'idées et d'expériences individuelles, se voulant toutes plus ou moins raisonnables, rationnelles, mais indubitablement libres, et colorées de l'imaginaire – et donc de l'environnement – de chacun(e).

Remerciements

Remerciements aux rapporteurs de ce travail pour leurs remarques fort constructives, à B. Berche, G. Hance et D. Karevski pour les discussions que ce travail a pu générer et leur écoute sans faille. En mémoire de Cathy Dufour.

Bibliographie

- ALLEN, Herbert Stanley [1913], *Photoelectricity, the Liberation of Electron by Light*, London : Longmans, Green.
- BRUSH, Stephen G. [2007], How ideas became knowledge : The light-quantum hypothesis 1905-1935, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 37, 204-246.
- COMPTON, Karl T. [1913], Note on the velocity of electrons liberated by photoelectric action, *Physical Review*, 1(5), 382-392.
- CORNELIUS, David W. [1913], The velocity of electrons in the photo-electric effect, as a function of the wave lengths of the light, *Physical Review*, 1, 16-34, doi :10.1103/PhysRev.1.16.
- EINSTEIN, Albert [1905], Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, *Annalen der Physik*, 322(6), 132-148, doi :10.1002/andp.19053220607, traduction française in Albert Einstein, Œuvres choisies, I Quanta, Paris : Éditions du Seuil, Éditions du CNRS, 1989.
- HUGHES, Arthur Llewelyn [1913], On the emission velocities of photo-electrons, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 212(484-496), 205-226, doi :10.1098/rsta.1913.0007, publié séparément en août 1912.

HUGHES, Arthur Llewelyn & DUBRIDGE, Lee Alvin [1932], *Photoelectric Phenomena*, New York : McGraw-Hill Book Company.

KADESCH, William H. & HENNINGS, A. E. [1916], The value of h determined photo-electrically from the ordinary metals, *Physical Review*, 8, 221–226, doi :10.1103/PhysRev.8.221.

KATZIR, Shaul [2006], Thermodynamic deduction versus quantum revolution : The failure of Richardson's theory of the photoelectric effect, *Annals of Science*, 63(4), 447–469, doi :10.1080/00033790600787417.

—— [2013], Theoretical challenges by experimental physics : Radiation and its interaction with matter, dans *Traditions and Transformations in the History of Quantum Physics*, Berlin : Edition Open Access, *Max Planck research library for the history and development of knowledge*, t. 5, 11–27.

KLASSEN, Stephen [2011], The photoelectric effect : Reconstructing the story for the physics classroom, *Science & Education*, 20(7–8), 719–731, doi : 10.1007/s11191-009-9214-6.

KUNZ, Jakob [1908], LXV. On the corpuscular theory of the thermoelectric forces, *Philosophical Magazine, Series 6*, 16(95), 767–789, doi :10.1080/14786441108636555.

—— [1909a], On the photoelectric properties of sodium-potassium alloy, *Physical Review (Series I)*, 29, 174–176, doi :10.1103/PhysRevSeriesI.29.174.

—— [1909b], On the photoelectric effect of sodium-potassium alloy and its bearing on the structure of the ether, *Physical Review (Series I)*, 29, 212–228, doi :10.1103/PhysRevSeriesI.29.212.

—— [1909c], On the electron theory of thermal radiation for small values of λT , *Physical Review (Series I)*, 28, 313–323, doi :10.1103/PhysRevSeriesI.28.313.

—— [1910a], On the initial velocity of electrons as a function of the wavelength in the photoelectric effect, *Physical Review (Series I)*, 31, 536–544, doi :10.1103/PhysRevSeriesI.31.536.

—— [1910b], Electromagnetic emission theory of light, *American Journal of Science, Series 4*, 30(179), 313–322, doi :10.2475/ajs.s4-30.179.313.

—— [1911], On the positive potential of metals in the photoelectric effect and the determination of the wave-length equivalent of Roentgen rays, *Physical Review (Series I)*, 33, 208–214, doi :10.1103/PhysRevSeriesI.33.208.

—— [1914], An attempt at an electromagnetic emission theory of light, *Physical Review*, 3, 464–475, doi :10.1103/PhysRev.3.464.

- [1915], The structure of γ rays on the basis of the electro-magnetic theory of light, *Physical Review*, 6, 413–418, doi :10.1103/PhysRev.6.413.
- [1927], The trend of modern physical science, *The Scientific Monthly*, 25, 417–420.
- MALOV, Ju.I., SHEBZUKHOV, M.D., & LAZAREV, V.B. [1974], Work functions of binary alloy systems with different kinds of phase diagrams, *Surface Science*, 44(1), 21–28, doi :http://dx.doi.org/10.1016/0039-6028(74)90090-9.
- MCCORMMACH, Russell [1967], J.J. Thomson and the structure of light, *The British Journal for the History of Science*, 3, 362–387, doi :10.1017/S0007087400002922.
- MILLIKAN, Robert Andrews [1910], Some new values of the positive potentials assumed by metals in a high vacuum under the influence of ultra-violet light, *Physical Review*, 30, 287–288.
- [1914], A direct determination of “ h ”, *Physical Review*, 4, 73–75, doi : 10.1103/PhysRev.4.73.2.
- [1916], A direct photoelectric determination of Planck’s “ h ”, *Physical Review*, 7, 355–388, doi :10.1103/PhysRev.7.355.
- NUGAYEV, Rinat M. [1996], Why did the new physics force out the old?, *International Studies in the Philosophy of Science*, 10(2), 127–140, doi : 10.1080/02698599608573534.
- RAMUNNI, Girolamo [1981], *Les Conceptions quantiques de 1911 à 1927*, Librairie Philosophique, Paris : Vrin.
- RICHARDSON, Owen W. [1902], On the negative radiation from hot platinum, dans *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, t. 11, 286–295.
- RICHARDSON, Owen W. & COMPTON, Karl T. [1912], LIII. The photoelectric effect, *Philosophical Magazine Series 6*, 24(142), 575–594, doi : 10.1080/14786441008637361.
- STEBBINS, Joel [1939], Jakob Kunz, 1874–1938, with Plate II, *Popular Astronomy*, 47, 117–121.
- STUEWER, Roger H. [1970], Non-Einsteinian interpretations of the photoelectric effect, dans *Historical and Philosophical Perspectives of Sciences*, édité par R.H. Stuewer, Minneapolis : Univ. of Minnesota Press, t. V, 246–263.

THOMSON, Joseph John [1907], On the ionization of gases by ultra-violet light and on the evidence as to the structure of light afforded by its electrical effects, dans *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, t. 14, 417–424.

WHEATON, Bruce R. [1978], Philipp Lenard and the photoelectric effect, 1889–1911, *Historical Studies in the Physical Sciences*, 9, 299–322.

—— [2008], *The Tiger and the Shark*, Cambridge : Cambridge University Press, première publication, 1983.