

L'Onde et l'Etat Quantique

XAVIER OUDET

Annales de la Fondation Louis de Broglie
23, rue Marsoulan, F-75012 Paris, France.
xavier-oudet@wanadoo.fr

RESUME. Après les débuts du modèle corpusculaire, la découverte de la fonction d'onde a semblé une meilleure approche pour décrire l'atome et a donné naissance à l'Ecole de Copenhague. Les tenants de cette conception n'ont pas réussi à ce jour à convaincre tous les chercheurs. Parmi les difficultés, les interférences dites de "photons un par un" où les photons arrivent successivement sur l'écran d'observation. Dans ces expériences un photon, considéré comme une onde, est supposé capable de passer simultanément par deux trous éloignés d'une distance de l'ordre du centimètre. Cette hypothèse suppose le photon nécessairement associé à une onde qui elle-même implique l'existence d'un éther. Cette situation conduit à rechercher une autre approche. Celle-ci suppose des échanges de masse entre le proton et l'électron qui sont la seule manifestation de l'onde.

ABSTRACT: After the beginning of the corpuscular model, the discovery of the wave function has seemed a better approach to describe the atom and has given birth to the Copenhagen School. The adherents of this conception up to now have not succeeded to convince all the researchers. Among the difficulties, the interferences named "One by one photon" where the photons arrive successively on the screen of observation. In these experiments one photon considered as a wave, is supposed able to go simultaneously across the both holes apart of about a distance of the order of one centimeter. This hypothesis suppose the photon necessarily associated to a wave which implies the existence of an ether. This situation lead to research an alternative approach. That suppose exchanges of mass between the proton and the electron which are the alone manifestation of the wave.

1 Introduction

Il y a cent ans Bohr proposait le premier modèle quantique basé sur le mouvement périodique des électrons dans l'atome [1]. Avec la découverte des propriétés ondulatoires de l'électron, ce modèle a aujourd'hui perdu pratiquement droit de cité. Pour tenter de bien saisir l'origine de cet état de fait je commencerais par rappeler l'origine de la notion d'onde, puis les expériences d'interférences qui semblent asseoir l'approche corpusculaire de la matière.

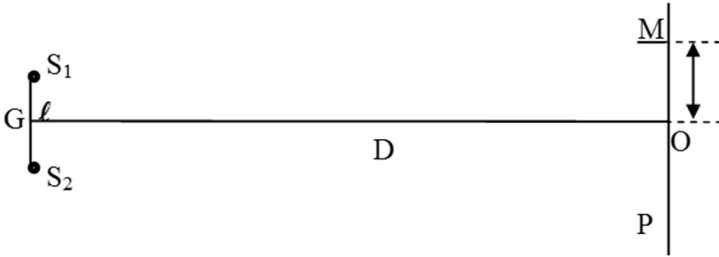


Figure 1. Schéma d'un dispositif d'interférences des trous d'Young. Un système optique donne d'une source S deux images S_1 et S_2 séparées par une distance l . On observe les franges d'interférence dans un plan P perpendiculaire à l'axe de symétrie GO du système.

La notion d'onde importante en physique, est également profondément ancrée dans notre vécu quotidien. Ce sont par exemple les ondes qui nous transmettent toutes sortes d'informations. Il paraît par suite tout naturel d'associer une onde à la lumière comme nous l'enseigne nos professeurs. Pourtant l'approche de Newton en 1704 [2] en s'appuyant sur la propagation rectiligne de la lumière pour expliquer les couleurs fut d'abord corpusculaire. L'onde s'est imposée dans l'étude des phénomènes associés à la lumière avec les travaux de Fresnel au début du 19^{ième} siècle [3]. Elle a ensuite envahi la physique corpusculaire avec l'hypothèse de de Broglie associant une onde à l'électron. Pourtant malgré des résultats remarquables : tel le microscope électronique, la radio et la télévision, l'approche ondulatoire de la lumière est loin de permettre une explication simple des interférences. Dans l'expérience classique, dite des trous d'Young (figure 1), deux faisceaux de lumière sont observés sur un écran et l'interprétation des interférences basée sur les propriétés ondulatoires de la lumière, ne semble pas poser de difficulté. Toutefois l'on sait depuis plus d'un

siècle qu'il est possible de réduire considérablement l'intensité des deux faisceaux tout en continuant à observer des interférences en accroissant la durée de réception de la lumière. Ce type d'expérience est appelé interférence de photons un par un ou à faible flux. Les tenants du modèle ondulatoire ont alors admis que chaque photon passe par les deux trous d'Young, hypothèse très surprenante compte tenu du diamètre des atomes qui émettent les photons.

Cette explication des interférences oublie en fait de considérer la possibilité pour les photons corpuscules qui transportent de l'énergie sans nécessairement être associé à une onde, d'être absorbés sur l'écran où ils sont observées. Avec cette hypothèse l'absorption permet aux photons d'attendre d'être en nombre suffisant pour être ensuite réémis, de manière différente suivant leur position M sur l'écran, ce qui donne les interférences. Les propriétés périodiques de la lumière sont en fait celle du mouvement périodique des électrons qui absorbent les photons [4].

2 Le facteur de Landé ou facteur g

L'étude de l'équation de Dirac [5] montre que le nombre quantique k de Sommerfeld¹, qui est supposé caractéristique du moment angulaire, peut prendre des valeurs positives ou négatives caractéristiques des deux sous-couches. De plus Dirac souligne que le produit $k(k+1)$ reste le même pour $k=\ell$ et $k=-(\ell+1)$. Cette remarque montre qu'il y a une incohérence entre le modèle de Dirac et celui de Schrödinger où l'on retrouve le produit $\ell(\ell+1)$, mais où seules sont considérées les valeurs positives de ℓ [6]. Par ailleurs dans la deuxième partie de ce mémoire Dirac [7] donne pour le facteur g de décomposition spectrale, aussi appelé facteur de Landé, l'expression :

$$g = k(k+1/2)^{-1} \quad (1)$$

Ainsi le facteur g dépend dans cette approche de la sous-couche. Ces remarques conduisent à chercher à comprendre le sens physique du nombre k et du facteur de Landé. Ce qui conduit à revisiter la mécanique quantique. Le facteur g est également à l'origine d'interprétations en magnétisme avec une grande cohérence [8]-[9].

¹ Dans son mémoire Dirac nome ce nombre j . Le label k est retenu pour rappeler le nom de l'astronome Kepler à qui nous devons la connaissance des trajectoires des planètes.

3 La mécanique quantique dans son approche corpusculaire

Bohr en 1913 a proposé la première interprétation quantique des mouvements de l'électron dans l'atome, avec sa théorie de l'atome d'hydrogène [1]. A cette époque Rutherford venait juste de proposer un modèle atomique avec un noyau positif contenant la plus grande partie de la masse, les électrons gravitant à la périphérie [10]. Il introduit la constante de Planck h , comme quantum d'action pour quantifier les différents niveaux d'énergie. En prenant pour hypothèse que les trajectoires électroniques sont des cercles et que l'énergie des différents niveaux est un multiple n entier de $h\nu$, il calcule la constante de Rydberg qui résulte de l'ensemble des différentes séries spectrales. Finalement il suppose que pour l'atome d'hydrogène la charge positive du noyau est égale à celle de l'électron et que $n = 1$. Les valeurs expérimentales connues donnent un très grand nombre de bonnes vérifications théoriques.

Rapidement après la théorie de l'atome d'hydrogène de Bohr, Sommerfeld a étendu le modèle de manière à inclure les orbites elliptiques [11]. Comme le dit White : "L'importance de cette extension peut être attribuée à la précision avec laquelle ces équations, avec les corrections relativistes, donnent la structure fine de l'énergie des niveaux et le spectre de raies de l'hydrogène [12]."

Wilson [13] et Sommerfeld ont proposés de manière pratiquement indépendante à peu près à la même époque de quantifier les différents degrés de liberté. Ils quantifient ainsi dans le mouvement plan le moment angulaire et le moment radial :

$$\oint p_{\varphi} d\varphi \quad (2)$$

$$\oint p_r dr \quad (3)$$

où k et r prennent uniquement des valeurs entières. Les solutions de ces deux équations conduisent en particulier à la relation :

$$k + r = n \quad (4)$$

Pour les atomes, considérés comme hydrogénoïdes, cette approche permet de calculer les différents niveaux d'énergie. Toutefois la quantification du mouvement de l'électron n'a aucune raison d'être confiné aux deux degrés de

liberté du plan de gravitation; pour résoudre cet aspect du problème quantique il y a lieu d'introduire un troisième nombre quantique. C'est la quantification spatiale. Pour l'introduire Sommerfeld imagine l'atome dans un champ magnétique uniforme H. Soit alors Oz la direction de ce champ perpendiculaire au plan équatorial contenant les axes Ox,Oy (figure2). Si l'action qui correspond à la composante du mouvement parallèle à l'axe Oz est quantifié il y a un nombre entier de quanta qui caractérisent ce mouvement. Les conditions quantiques sont alors :

$$\oint p_r dr = rh, \quad \oint p_\theta d\theta = th, \quad \oint p_\phi d\phi = mh \tag{5}$$

avec $k = t + m$ (6)

et $-k \leq m \leq k$ (7)

En excluant la valeur m = 0, cette approche donne le bon nombre d'états quantiques pour les différentes valeurs entières de k. Toutefois ce modèle ne donne pas de réponse à l'existence des doublets ; par ailleurs l'introduction de la direction Oz pour quantifier le moment magnétique reste arbitraire. Il y a lieu de rechercher à quantifier l'espace sans arbitraire d'une manière plus générale de telle sorte que les trois nombres quantiques n, k et m soient interdépendants.

4 L'espace

Einstein en 1905, avec son étude de la relativité restreinte, a montré qu'il n'y a pas d'espace absolu et que "[les lois physiques doivent être indépendantes du lieu d'observation](#)", ce qui a fait faire un pas de géant à la physique [14]. Par suite il n'est venu à personne l'idée qu'il pouvait y avoir un manque dans cette analyse. Pourtant les difficultés rencontrées par l'approche corpusculaire de la mécanique quantique sont bien liées à la notion d'espace. En effet s'il n'y a pas d'espace absolu il faut se demander comment se construit l'espace. A l'échelle macroscopique il est facile de le définir par rapport aux objets qui l'occupent, sans oublier les gaz qui remplissent les volumes entre les objets, gaz qui transmettent par exemple le son. Mais qu'en est-il à l'échelle de l'atome ? Jusqu'ici le champ électromagnétique nous a permis de d'écrire le mouvement de l'électron autour du noyau. Mais Einstein nous a également appris que la masse est équivalente à une quantité d'énergie [15] en établissant la relation :

$$E = mc^2 \tag{2}$$

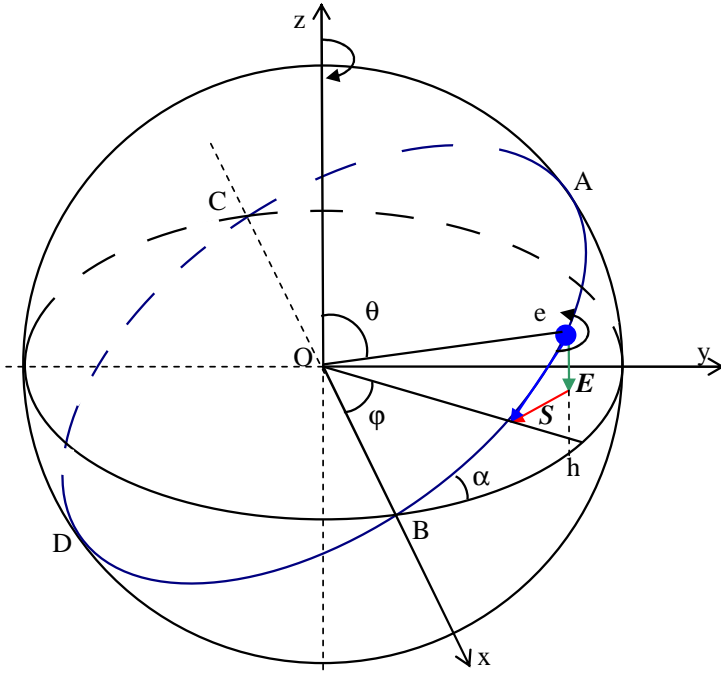


Figure 2. Le mouvement de l'électron pour un état "1s". Le point O est le centre du potentiel, le plan du mouvement ABCD, le plan équatorial Ox,Oy. Le cercle "e" représente l'électron sur sa trajectoire. La flèche sur le demi-cercle en haut de l'axe z repère le sens de rotation du proton inverse de celui de l'électron e. Les vecteurs E et S symbolisent les quantités de mouvement des flux entrant et sortant.

Cette énergie est énorme, si bien qu'elle suggère que le champ électromagnétique peut être décrit par un flux discontinu de grains de matière constituant la masse entre le proton et l'électron. Plus précisément par deux flux : l'un allant du proton à l'électron l'autre allant de l'électron au proton, ces deux flux ne suivant pas partout le même trajet de telle façon que l'action résultante engendre le mouvement. *Les grains de matière sont supposés extrêmement petits devant les masses du proton et de l'électron. Ainsi le proton et l'électron forme un tout fluide et c'est le mouvement de l'un par rapport à l'autre qui*

permet de les distinguer. Ce sont les deux flux qui sont le support de la notion d'onde. L'énergie ainsi concernée est celle de l'état quantique de l'électron, elle est très faible devant la masse de chacune des deux particules. Cette conception permet d'être en accord avec la conclusion de Einstein qui suppose l'absence d'éther c'est-à-dire de tout grain ou point masse dans le vide [14]. Lorsque l'électron est à l'infini, il a reçu l'énergie qui le liait au proton, il a sa masse inerte totale et il n'y a plus de fonction d'onde à considérer.

Cette approche conduit à considérer le volume de l'électron et du proton. Cette nécessité de considérer le volume des particules est importante car c'est lui qui donne du sens physique à l'existence d'un axe de rotation orbitale mais également propre ou spin dans le mouvement. De plus cette nécessité conduit à mieux prendre conscience non seulement du mouvement de rotation de l'un par rapport à l'autre mais également du fait qu'il y a nécessairement un mouvement relatif de translation parallèle à l'axe de rotation. En effet ces deux mouvements s'imposent pour distinguer les deux particules dans les trois directions de l'espace au même titre que leur masse respective.

Pour décrire les mouvements de l'électron par rapport au proton nous considérons un référentiel atomique R_a , formé d'un système d'axes orthogonaux, le centre de gravité O du proton étant à l'origine (figure 2). Ce centre O est également le centre du potentiel qui agit sur l'électron. L'intensité du potentiel en un point P est inversement proportionnelle à la distance OP . La densité de matière qui permet de décrire le potentiel est par suite elle-même inversement proportionnelle à cette distance. Soit alors γ le centre de gravité de l'électron. Les lois physiques doivent être indépendantes du lieu d'observation par suite, comme pour le potentiel, nous supposons que dans le volume de l'électron la densité de matière qui permet de décrire la charge de l'électron est inversement proportionnelle à la distance au centre γ de gravité de l'électron. La surface qui délimite dans le volume du proton et celui de l'électron est par suite celle qui correspond au minimum de densité. C'est au travers de cette surface que les échanges de matière déterminent l'action et la trajectoire. Dans un système de coordonnées où le centre du potentiel est fixe, la rotation du proton est représentée par une flèche de sens opposé à celle symbolisant la rotation de l'électron, figure 2. Dans l'approche de Bohr Sommerfeld comme variables décrivant le temps et l'espace on considère la relation $E = h\nu$ qui introduit la période du mouvement, puis dans le plan orbital la distance radiale ; si celle-ci est constante, la trajectoire est un cercle, dans les autres cas c'est une ellipse. Il manque comme Sommerfeld s'en était rendu compte la dimension perpendiculaire. Parmi les tentatives proposées pour résoudre cette absence il y a lieu

de citer celle de G. Mastrocinque qui introduit les oscillations de Bernoulli qui supposent des fluctuations d'énergie et des variations de masse [16].

La solution que nous proposons suppose que le vide ne peut pas transmettre l'interaction et que c'est de la masse sous forme de grains qui la transmet, il y a donc lieu de quantifier toutes les directions de l'espace. Il en résulte que l'axe de rotation du mouvement contribue également à la quantification [17]. Ainsi lorsque l'électron se déplace par rapport au proton supposé fixe, en dehors des variations de la distance radiale, sur un court intervalle de temps il y a trois degrés de liberté : la rotation, la translation le long de l'axe de rotation et la masse ; ils donnent naissance à deux mouvements : la rotation et la translation. La symétrie de l'espace conduit à supposer que le quantum d'action se partage de manière égale entre les mouvements propres de rotation et de translation, d'où les nombres demi-entiers.

Considérons alors un état $1s$ de l'électron initialement à l'infini, l'interaction conduit à l'émission d'un photon. Cette émission par réaction provoque un recul de l'électron, la résistance de la masse entrainera alternativement un ralentissement puis un mouvement inverse. Le mouvement de translation devient oscillatoire. Il en résulte que les deux flux qui caractérisent l'interaction entre le proton et l'électron fluctuent. Les échanges de masse avec le proton, entraînent pour ces deux mouvements le mouvement orbital. L'action de ce mouvement est par suite égale à la somme de celle des mouvements propres, le moment cinétique est donc égale à \hbar mais elle engendre un mouvement opposé aux deux mouvements propres. Il y a donc lieu de compter négativement, soit $-\hbar$ le moment cinétique correspondant, si celui de la rotation propre est compté positivement. Par suite, l'action orbitale engendrant le mouvement de translation parallèle à l'axe de rotation est également opposée à l'action intrinsèque.

Si l'électron reçoit une quantité de mouvement supplémentaire, celle-ci sera quantifiée suivant les trois degrés de liberté de l'espace : la rotation, la translation et la distance radiale ; c'est l'augmentation de la masse qui permet l'augmentation du nombre des quanta. Les premières couches sont les états "ns" avec seulement deux états ; puis viennent les états "np" à partir de n égal à deux. Les états additionnels peuvent s'ajouter à la rotation ou à la translation ils donnent naissance aux deux sous-couches.

Pour le mouvement orbital chaque quantum additionnel apporte une contribution au moment cinétique qui peut s'ajouter ou se retrancher au demi-

quantum originel ce qui introduit un facteur g dans le calcul du moment magnétique de chaque état quantique. En effet par rapport à l'approche de Bohr Sommerfeld il faut tenir compte de ce que la moitié du quantum d'action soit " $\frac{1}{2}h$ " induit le mouvement le long de l'axe de rotation. Il vient :

$$g(k+\frac{1}{2}) = k$$

Nous retrouvons la relation (1) du à Dirac. Dans cette relation k est un entier égal à -1 pour les états "ns" ; pour les autres états ils sont engendrés par absorption d'un photon, ils et positif ou négatif avec " n " > 1 . C'est cette relation qui donne accès au calcul théorique des moments magnétiques des métaux et de divers composés [8][9].

Le quantum d'action apparaît ainsi comme agissant aussi bien sur la direction de l'axe de rotation que sur la rotation elle-même, il quantifie ainsi toutes les directions de l'espace. Les interactions entraînant des variations de masse, la trajectoire peut se modifier de manière à conserver le nombre de quanta. C'est cette propriété qui permet de comprendre la stabilité des propriétés quantiques des différents électrons des éléments dans leurs composés. C'est ce dont témoignent le calcul des moments magnétiques et plus généralement le tableau périodique des éléments.

5 La mécanique quantique dans son approche ondulatoire

Il est naturel que les variations de l'action décrivent l'interaction entre le proton et l'électron le long de la trajectoire. C'est ce que montre l'équation différentielle proposée par Schrödinger en 1926. Inspirée par l'hypothèse de Louis de Broglie : « d'une onde associée à l'électron » les fonctions solutions de cette équation porte le nom de Fonction d'onde. Il manque toutefois dans cette première étape les niveaux doublets. C'est alors Dirac qui en 1928 propose une nouvelle équation qui possède l'ensemble des niveaux d'énergie c'est-à-dire les niveaux doublets en plus de ceux déjà obtenus. Il arrive à ce résultat car il introduit les corrections relativistes de masse qui, dans cette approche, sont les variations de masse. L'étude de ces solutions, en supposant la vitesse de la lumière tendant vers l'infini, montre qu'elles tendent vers celles de Schrödinger [6], à condition de retenir pour k les valeurs $k = \ell$ et avec $k = -(\ell+1)$.

Considérons maintenant l'hypothèse de Louis de Broglie d'une onde associée à l'électron qui a conduit à la découverte des équations d'onde, les fonctions d'onde associées décrivent l'interaction entre le noyau et l'électrons elles

disparaissent dès que l'électron quitte la zone d'attraction de l'atome. En fait l'hypothèse de Louis de Broglie conduit à prolonger la notion de continu à l'échelle des interactions entre les constituants de l'atome. Le continu nous apparaît ainsi toujours intimement lié au discontinu. Mais il y a lieu de garder à l'esprit que le point est un concept mathématique qui n'a pas de volume et de ce fait pas de réalité physique. Le continu apparaît par suite une commodité mais il ne faut pas perdre de vue que la réalité matérielle reste le discontinu, même l'interaction doit être décrite par le discontinu comme nous l'avons supposé avec des grains de matière ayant une masse. Ce fut d'ailleurs en constatant que la lumière nous venait des atomes, donc émise par un ensemble fini d'atomes, qu'Einstein fut amené à proposer l'hypothèse du photon. Revenons alors à la symétrie entre le mouvement d'un mobile et la propagation d'une onde qui conduisit de Broglie à associer une onde à l'électron [18]; il est tout aussi possible d'associer un flux de particules matérielles à l'onde, par exemple de lumière, rejoignant ainsi l'hypothèse du photon d'Einstein [15]. Par contre si le nombre des photons devient faible, alors le support du continu qu'est l'onde ne permet plus d'interpréter les interférences ; il faut alors considérer le stockage des photons là où sont observées les interférences [4].

6 Recherche et paradoxe

La dualité onde corpuscule restait pour moi une énigme. L'algèbre des matrices telle que l'utilise Dirac m'était hermétique. Sans un sens physique clair à mes yeux, l'algèbre des opérateurs restait mystérieuse et le modèle de Bohr Sommerfeld a toujours eu ma préférence. Avec lui plusieurs questions relatives à la structure cristalline des corps obtenaient une réponse simple : par exemple la diminution de la température de congélation de l'eau en présence d'impuretés (loi de Raoult), que l'on retrouve en paramagnétisme avec la diminution de la température de Curie. Cette propriété, si nous admettons l'existence d'un mouvement périodique pour les électrons de liaison, résulte de la perturbation du mouvement synchrone de ces électrons par les atomes d'impureté.

Comme nous l'avons vu à plusieurs reprises la notion de point est un obstacle considérable pour progresser vers une meilleure compréhension de la physique atomique. Derrière cette difficulté il y a les mathématiques qui règnent en maître sur la physique alors que c'est la physique ou d'une manière plus large l'expérience qui a permis de construire les mathématiques. Il en résulte les difficultés des adeptes de l'école de Copenhague qui ne prend pas en compte le fait que tout objet a un volume et qu'à l'échelle atomique la notion de point a pratiquement perdu une grande partie de sa valeur. Le langage des

mathématiques est remarquable et je l'ai toujours aimé ; je me rappelle le Professeur Laurent Schwartz nous enseignant l'algèbre symbolique où les opérateurs peuvent être manipulés comme des nombres qui permettent de résoudre les équations différentielles, j'étais plein d'admiration et je le reste. Mais, malgré l'élégance de la méthode, les difficultés du continu et de l'infini demeurent. Je souhaite que ces quelques lignes puissent aider les chercheurs.

Références

- [1] Bohr N., Phil. Mag., 26, 1-25, and 476-502, (1913).
- [2] Newton, Optiks or a treatise of the reflection, refraction, inflection and colours of light (1704), new edition based on the fourth edition London, 1730, Dover Publications. Version française: *Traté d'optique*, Reproduction fac-similé de l'édition de 1722, Gautier-Villard, (1955).
- [3] A. Fresnel, Le premier mémoire date de 1815. La quasi intégralité de son œuvre a été publiée sous la direction de Messieurs Henri de Senarmont, Emile Verdet et Léonor Fresnel, par le Ministère de l'Instruction publique de 1866 à 1870.
- [4] Oudet X., Ann. Fondation Louis de Broglie, 30, 97-108, (2005).
- [5] Dirac P.A.M., Proc. Roy. Soc. A117, 610-624, (1928) and A118, 351-361 (1928).
- [6] Oudet X., Annales de la Fondation Louis de Broglie, 6, 127-64 (1981).
- [7] Dirac P.A.M., Proc. Roy. Soc. A118, 351-361, (1928).
- [8] Oudet X., G. Lochak, J. Magn. Magn Mater. 65, 99-122 (1987).
- [9] Oudet X., J. Mag. Mag. Mat. Vol 272-276P1 pp 562-564, proceeding of ICM-2003, 2004, Edited by D. Fiorani and L. Paretì.
- [10] Rutherford L.M., Phil. Mag., 21, 669, (1911).
- [11] Sommerfeld A., Ann. Phys. 51, 1, (1916).
- [12] White H.E., *Introduction to Atomic Spectra*, McGraw-Hill Book Company, Inc. New-York and London, (1934).
- [13] Wilson W., Phil. Mag., 29, 795, (1915).
- [14] Einstein A, Ann. der Physik, 17, 891-921, (1905). Traduction française de Solovine, Gautier-Villars, (1955).
- [15] Einstein A., Annalen der Physik, 17, 132-148, (1905).
- [16] Mastrocinque G., Annales de la fondation Louis de Broglie, 36, 91-116, 2011
- [17] Oudet X., Ann. Fondation Louis de Broglie, 36, 137-157, (2011).
- [18] De Broglie L., Thèse 1924, voir chapitre II.

Manuscrit reçu le 29 novembre 2015.