

L'état quantique, le magnétisme et la rotation

XAVIER OUDET

Fondation Louis de Broglie, 23 rue Marsoulan, 75012 Paris, France

E-mail: xavier-oudet@wanadoo.fr

En électrodynamique tout comme en mécanique aucune propriété des phénomènes ne correspond à la notion de mouvement absolu, Albert Einstein [1].

RÉSUMÉ. La notion de rotation intrinsèque de l'électron ou spin est réexaminée. Dans ce but il est d'abord souligné que la symétrie du mouvement de rotation révèle un axe de rotation pour l'électron qui ne saurait être indépendant de celle du proton. Par ailleurs la relativité du mouvement impose que les causes qui l'engendrent soient les mêmes dans l'espace de l'électron et dans celui du proton. Ceci conduit à supposer que les quantités de mouvement sont le résultat de variations de masse inerte entre l'électron et le proton, sous forme de grains de matières très petit par rapport à la masse de l'électron. Il en résulte deux flux de matière de sens opposés entre l'électron et le proton qui conduisent à une interprétation de l'expérience de Stern et Gerlach où le champ magnétique ne modifie pas le même flux suivant l'état considéré.

ABSTRACT. The notion of intrinsic rotation of the electron or spin is revisited. In this respect, it is first underlined that the symmetry of the motion of rotation reveals a corresponding axis on the electron, which cannot be independent from that of the proton. Furthermore, the relativity of motion requires that the same causes must be responsible for it in the space of the electron as well in that of the proton. This leads to suppose that the moments are due to exchange of inert mass between the electron and the proton in a form of very small grains compared to the mass of the electron. As a result, there are two fluxes of matter in opposite way between the electron and the proton; they lead to an interpretation of the Stern and Gerlach experiments where the magnetic field does not modify the same flux according to the considered state.

1 Introduction

L'interprétation de l'état quantique, de la fonction d'onde et des doublets conduit à supposer, pour l'électron en mouvement, une masse inerte variable [2] tout en conservant le caractère corpusculaire du modèle de Sommerfeld [3]. Ces résultats ont permis une interprétation du rôle de valence de la couche 4f et des éclairages nouveaux sur quelques structures cristallines [4]. Dans ce modèle quantique le proton et l'électron sont supposés constitués de petits éléments que nous avons appelé grains de matière tout comme le champ électrique et magnétique. Ces grains forment ainsi deux flux opposés qui sont échangés entre l'électron et le proton et entretiennent le mouvement de l'un par rapport à l'autre dans un état stationnaire. Cette conception de l'atome met en évidence le lien étroit entre la masse et les degrés de libertés du mouvement ; elle permet par suite de décrire la fonction d'onde dans l'équation de Dirac comme l'action mécanique dont les éléments différentiels par rapport à l'espace et au temps donnent accès aux composantes de la quantité de mouvement et à l'énergie du mouvement.

Il reste toutefois une difficulté à éclairer, en effet avec une masse variable, en plus des états déjà identifiés, l'existence des doublets vient de la possibilité pour l'électron d'absorber un quantum sous forme de masse inerte qui augmente d'autant le moment cinétique et rend compte de la structure fine. Par suite si la rotation de l'électron sur lui-même reste une propriété fondamentale, elle n'est pas la cause des doublets. En fait introduire la rotation de l'électron c'est introduire un mouvement qui ne saurait être indépendant d'une rotation du proton comme le laisse entrevoir l'hypothèse des deux flux inverses l'un de l'autre. C'est ce que montre cette étude qui complète celle intitulée « La symétrie du mouvement et la masse » avec l'interprétation de l'expérience de Stern et Gerlach [5], [6] et des états magnétiques. Le *paragraphe* 2 revient sur l'absence d'espace absolu et sur les aspects de symétrie, le *paragraphe* 3 discute les degrés de liberté du système électron proton, le *paragraphe* 4 interprète les expériences de Stern et Gerlach, le *paragraphe* 5 discute les différents états magnétiques.

2 La symétrie du mouvement

L'étude expérimentale des raies spectrales émises par un atome révèle qu'elles se classent en séries. Certaines raies de ces séries sont doubles appelées doublets réguliers. L'exemple classique est celui de la raie D du sodium dont les longueurs d'onde respectives sont $\lambda_1 = 5890\text{\AA}$ et $\lambda_2 = 5896\text{\AA}$. L'ensemble des raies ainsi observées pour différents atomes forme avec le

tableau périodique la base expérimentale de l'état quantique. Pour interpréter les raies spectrales Sommerfeld a été amené à quantifier, dans l'étude du mouvement de l'électron autour du proton, l'action angulaire et radiale [3]. Cette manière de faire aboutie à un grand nombre de résultats remarquables mais laisse sans réponse l'origine des doublets réguliers et l'existence des nombres quantiques demi-entiers [7]. Sans hypothèse sur la variation de la masse, seule l'introduction des fonctions d'onde et le modèle théorique de Dirac [8] ont permis de retrouver l'ensemble des états quantiques avec leurs nombres demi-entiers et les niveaux d'énergie associés aux doublets réguliers. Par ailleurs dans l'état actuel des recherches ces deux théories aboutissent à la même expression de l'énergie des niveaux des différents états quantiques alors que l'existence des doublets réguliers échappe à l'approche corpusculaire de Sommerfeld.

Le modèle de Sommerfeld avec la notion de trajectoire et son corollaire la périodicité du mouvement possède toutefois une force explicative remarquable qui échappe à celui de Dirac. Par exemple il permet de comprendre l'attraction entre atomes, de même la notion de trajectoire de l'électron nous a permis de proposer une interprétation du mécanisme de la conductibilité et de la supraconductivité dans les oxydes supraconducteurs [9]. Par ailleurs l'hypothèse d'une trajectoire est suggérée par les propriétés magnétiques de la matière : en effet le magnétisme est avant tout le reflet du mouvement des charges. Ces différentes remarques suggèrent que l'équation de Dirac donne accès à des aspects particuliers de la trajectoire [2]. Pour discuter de la rotation nous utiliserons les hypothèses émises en reprenant la discussion de la symétrie du mouvement.

Dans le modèle de Sommerfeld l'électron assimilé à un point ne peut pas manifester de propriété de volume comme un axe de rotation. Il est généralement supposé qu'il gravite autour du proton dans un mouvement plan, cette rotation est bien décrite avec un potentiel sphérique, mais toutefois il y a dissymétrie entre le potentiel sphérique et le mouvement plan caractéristique d'un axe de symétrie ou au moins d'une direction de droites perpendiculaire au plan.

Le problème de la rotation de l'électron rappelle celui de la rotation de la terre par rapport à un espace absolu. Par expérience nous savons que les corps en mouvement décrivent une trajectoire, mais celle-ci n'a pas de matérialité, sur un court intervalle de temps il n'y a pas de lien matériel entre cette trajectoire et les deux particules en mouvement l'une par rapport à l'autre. En fait depuis l'hypothèse de Newton $F = m\gamma$, nous acceptons des interactions à

distance sans avoir résolu la question de leur nature ce qui à notre insu nous conduit à prendre des hypothèses où l'espace absolu reste présent de manière plus ou moins évidente. Reprenons l'hypothèse d'Einstein sur la relativité du mouvement [1] que nous exprimerons ainsi "*dans l'étude des phénomènes les causes des lois physiques doivent être indépendantes du lieu de l'observation*". Considérons alors l'électron et le proton, et demandons-nous quelles sont les variables susceptibles d'engendrer une force ? Lorsque la vitesse de l'électron varie, dans le volume de l'électron, seules des variations de sa masse inerte peuvent lui être associées et réciproquement pour le proton. Il y a donc lieu de considérer que ce sont les variations de la masse inerte entre l'électron et le proton qui sont à l'origine des variations de la vitesse et par suite de la quantité de mouvement correspondante. Pour qu'il en soit ainsi l'électron et le proton sont supposés de la matière fluide et la fonction d'onde une onde de matière c'est à dire la quantité de matière déterminant l'action mécanique qui guide l'électron le long de sa trajectoire [10]-[11]. Nous supposons que cette matière peut se décrire à l'aide de grains très petits par rapport à la masse de l'électron comme du proton.

Revenons alors à la symétrie du potentiel qui ne correspond pas à celle du mouvement de rotation plan caractéristique d'un axe de symétrie ou d'une direction de droite perpendiculaire au plan et reprenons l'analyse de Pierre Curie [12] des relations entre les causes et les effets des éléments de symétries d'un phénomène. Il s'exprimait ainsi :

Lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits.

Lorsque certains effets révèlent une certaine dissymétrie, cette dissymétrie doit se retrouver dans les causes qui lui ont donné naissance.

Dans cet esprit, compte tenu de l'absence d'espace absolu, le mouvement orbital de l'électron est inséparable de son mouvement de rotation sur lui-même. Pour décrire le mouvement de l'électron, nous devons en plus du potentiel introduire les propriétés de symétrie du mouvement orbital dans le volume de l'électron. Considérons un système de coordonnées fixe par rapport à la rotation orbitale, nous supposons que celle-ci est le reflet de la rotation de l'électron appelé "rotation intrinsèque ou propre". En fait il n'y a pas de propriété intrinsèque ou propre, tout ce que nous connaissons se définit par rapport à un autre objet ou une autre propriété, ce qui est une autre manière d'exprimer l'absence d'espace absolu. Ainsi s'il y a une rotation de l'électron sur lui-même c'est que cette rotation est le reflet de celle du proton. Nous supposons donc que la rotation propre de l'électron est inséparable de celle du proton et qu'elle est gouvernée par le **quantum d'action intrinsèque** « h » que nous continuons à appeler ainsi malgré l'ambiguïté du terme, par ailleurs nous

utilisons intrinsèque plutôt que rotation ou spin car ce quantum induit également un mouvement de translation comme nous le verrons à la section 3. Ainsi la rotation de l'électron est une propriété relative qui ne saurait avoir deux orientations par rapport à celle du proton contrairement à l'hypothèse d'Uhlenbeck et Goudsmit [13] et [14] où le moment cinétique associé à l'électron appelé spin, peut s'additionner ou se soustraire au moment cinétique orbital qui est en fait le moment cinétique de l'électron.

Ainsi cette approche du mouvement conduit à considérer entre le proton et l'électron deux flux de matière de sens opposés et à supposer que leurs rotations respectives sont le résultat de l'action et la réaction de telle sorte qu'ils tournent en sens opposé¹. Ces aspects sont représentés par des flèches de sens opposés sur la figure 1.

3 La masse et les degrés de liberté du mouvement

Dans le modèle de Sommerfeld le mouvement est plan, il y a seulement deux degrés de liberté indépendants. Par contre les échanges de matière, qui déterminent l'action et engendrent les quantités de mouvement de l'électron, ont lieu dans un volume. *Par suite l'action associée à la rotation ne peut pas être correctement décrite par le produit de deux vecteurs*, la quantité de mouvement et le déplacement dl , tous les deux contenus dans le plan de la trajectoire. Ces deux vecteurs doivent nécessairement posséder une composante hors du plan de la trajectoire. Les deux composantes viennent des deux flux qui déterminent sur l'électron, sur un court intervalle de temps dt et d'espace dl , *une somme des grains entrants et une autre de grains sortants. Les vitesses associées à ces deux sommes doivent nécessairement appartenir à deux degrés de liberté indépendants de manière à ce que l'action de l'une n'annihile pas celle de l'autre.* Les deux directions indépendantes du mouvement circulaire sont l'une parallèle à l'axe de rotation et l'autre parallèle au plan équatorial et déterminée par la vitesse angulaire $v(\varphi)$ de l'angle φ (figure 1).

Considérons alors les deux états circulaires " I_s ", ils sont engendrés par le seul quantum d'action \hbar , seules les actions équatoriale et axiale sont à considérer, ce modèle conduit donc à supposer que le **quantum d'action intrinsèque**

¹ Nous restreignons cette étude au cas du proton, car si par bien des aspects il semble possible de l'étendre au noyau, il reste que la masse étant supposée variable, il faudrait discuter du rôle des neutrons par rapport aux protons ce qui est un tout autre sujet.

que induit deux composantes du mouvement: une circulaire et une parallèle à l'axe Oz. Le mouvement de translation de l'électron parallèle à Oz, tout comme le mouvement de rotation, doit résulter par action réaction du fait des deux flux du mouvement, il est donc toujours opposé à celui du proton. C'est la résultante de ces deux mouvements qui quantifient l'action associée à l'électron dans son mouvement orbital par échanges de matière c'est-à-dire d'énergie, nous l'appellerons **le mouvement intrinsèque**. Ces deux composantes du mouvement intrinsèque correspondent l'une à la somme des grains entrants, l'autre à celle des grains sortants ; par suite les actions correspondantes doivent être égales. C'est de ce partage de l'action intrinsèque en deux quantités égales que vient les nombres quantiques demi-entiers qui se manifestent dans les mesures magnétiques. C'est ainsi qu'il y a lieu de comprendre, *par action réaction, le mouvement intrinsèque*. Le lien entre les différentes composantes de l'action est la masse inerte de l'électron pendant le mouvement qui est par suite un quatrième degré de liberté.

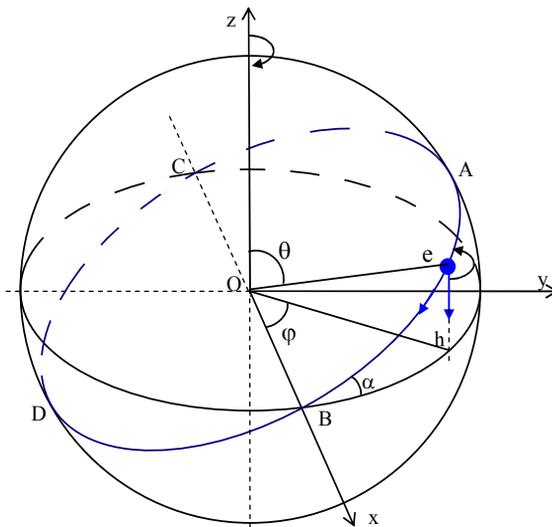


Figure 1. Le mouvement de l'électron. Le point O est le centre du potentiel, le plan du mouvement ABCD, le plan équatorial Ox,Oy. Le cercle "e" représente l'électron sur sa trajectoire. La flèche sur le demi-cercle en haut de l'axe z repère le sens de rotation du proton inverse de celui de l'électron e.

Considérons alors à un état quantique avec variation de la vitesse radiale. Un tel état résulte d'une vitesse initiale qui écarte ou rapproche l'électron du centre du potentiel O. De ce fait la densité de matière avec laquelle il interagit diminue ou croît d'où les variations de masse. Pour que l'énergie totale reste constante, le mouvement entraîne une absorption de grains qui augmente la masse inerte en s'écartant de O et une perte de grains qui diminue la masse inerte en se rapprochant de O, tout en diminuant ou augmentant l'énergie cinétique. Pour le mouvement circulaire des états "Is", leur composante de vitesse Oz s'annule en A et D sur la *figure 1*, il y a également variation de la masse entrante ou sortante dans cette direction.

Il est alors possible de compléter le modèle de Sommerfeld, prenons pour sens positif de rotation celui du proton par rapport à l'électron, pour les deux états "Is", *l'énergie cinétique du mouvement qui vient du proton se développe toujours en opposition au mouvement intrinsèque de l'électron*. Cette énergie développe ainsi : soit le mouvement de rotation avec le flux entrant et induit celui de translation avec le flux sortant, il a pour nombre quantique magnétique $m = 0$ et pour moment cinétique $-\frac{1}{2}\hbar$; soit le mouvement linéaire avec le flux entrant et induit le mouvement de rotation avec le flux sortant, il a pour nombre quantique magnétique $m = 1$ et pour moment cinétique $+\frac{1}{2}\hbar$. Ces deux mouvements entraînent ainsi l'électron dans un mouvement de rotation orbitale : soit dans le sens de celui du proton, soit dans le sens inverse.

Les autres états correspondent à une augmentation de la masse inerte, la périodicité du mouvement est celle du mouvement intrinsèque de rotation de l'électron gouvernée par le quantum d'action intrinsèque, il impose un nombre entier de quantum d'action. Pour un nombre de quanta donnés, les différents états quantiques correspondent à leur répartition entre les trois degrés de liberté associé à l'espace et la masse inerte. En particulier les doublets correspondent, pour un même nombre de quanta, à un même moment cinétique avec deux masses inertes très proches mais distinctes. Par contre ils ne correspondent pas à deux sens de rotations intrinsèques distinctes, comme l'existence de moments magnétiques égaux et opposés à permis de le croire, nous savons en fait que les doublets s'observent en spectroscopie en dehors d'un champ magnétique. Considérons alors l'action kh dont la quantification fut initialement introduite par Sommerfeld [3] comme celle du moment cinétique du mouvement plan; le nombre quantique k représentait le nombre de quanta du moment cinétique, ce nombre correspond encore au nombre de quanta du mouvement plan circulaire mais avec un moment cinétique qui diffère de $\pm\frac{1}{2}\hbar$.

4 La quantification spatiale et l'expérience de Stern et Gerlach

Le comportement d'un atome dans un champ magnétique montre l'existence d'un nombre pair de niveaux d'énergie. C'est en particulier le cas d'un ensemble d'atomes identiques ayant un seul électron externe dans un état " ns ", les autres électrons ayant une résultante magnétique nulle. En effet lorsque ces atomes sortent d'un four et traversent un champ magnétique comme dans les expériences de Stern et Gerlach [5], [15], on observe deux niveaux. Dans ces expériences, *figure 2*, un jet d'atomes sort d'un four par l'orifice O , il est délimité par la fente F , puis passe dans la région du champ pour être reçu sur la plaque A . Le champ inhomogène est produit par l'électroaimant E dont les pièces polaires sont l'une en forme de coin l'autre de rainure. L'expérience montre que le jet après avoir traversé le champ magnétique inhomogène donne naissance à deux taches sur la plaque qui sert à les détecter et qui sont disposées symétriquement de part et d'autre de la tache centrale obtenue en l'absence de champ. Pour chacune des taches la déviation correspond à un magnéton de Bohr. Ces expériences étaient initialement mises en œuvre pour étudier la distribution des vitesses des atomes du jet. Selon la théorie de Maxwell il devrait se former une seule tache allongée plus dense au centre, les bords les plus éloignés du centre correspondant aux faibles vitesses. L'observation de deux taches établit l'existence de deux états magnétiques distincts pour les niveaux " ns " si n est le nombre quantique principal, ce qui fut appelé la quantification spatiale.

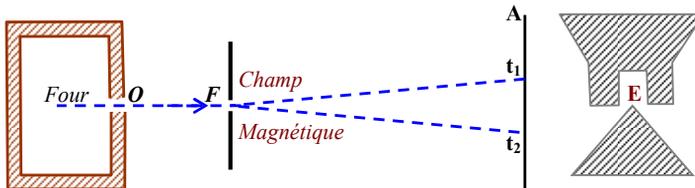


Figure 2. Schéma de l'appareil de Stern et Gerlach d'après Stoner [15].

Ceci étant l'existence de deux taches pour les atomes ayant un seul électron externe dans un état " ns " montre que dans l'atome, l'orientation du moment magnétique de chacun des deux états " s " est spécifique de chaque état. Il faut en effet une propriété de l'atome qui impose à chacun des états de subir une déflexion opposée. Dans le modèle proposé ici, *il y a lieu de supposer que c'est la rotation caractéristique du mouvement de l'électron par rapport au proton qui reste la même quel que soit le moment magnétique orbital, la différence venant, entre les deux états, de la répartition des flux entrant et*

sortant entre les deux degrés de liberté qui inversent le moment magnétique suivant l'état considéré. En effet, la masse inerte est constamment renouvelée par les échanges qui déterminent la rotation ; elle est par ailleurs très supérieure à celle équivalente aux échanges de matière qui déterminent l'énergie cinétique d'un état quantique. Par suite en présence d'un champ magnétique ces échanges stabilisent l'axe de rotation dans la direction du champ de manière à augmenter ou diminuer les échanges de matière, c'est-à-dire l'énergie de l'interaction.

En effet de cette manière le champ magnétique produit un flux additionnel, il modifie le flux correspondant au plan équatorial qui est différent suivant l'état quantique "ns" en cause. Il en résulte un déplacement de sens opposé pour chacun des deux états "ns". *Si le flux additionnel tend à accélérer la rotation, l'atome est attiré vers le champ magnétique croissant et inversement si le flux additionnel tend à freiner la rotation.* Par ailleurs les échanges continuels entre les deux flux tendent à les équilibrer.

Une des difficultés pour aborder cette interprétation vient de ce que toute notre expérience sur les interactions entre courant et champ magnétique est basée sur des champs magnétiques créés par des courants macroscopiques c'est-à-dire par un seul type de flux de matière. De ce fait il semblait que deux courants atomiques de sens opposé devaient pouvoir se retourner sous l'influence du champ magnétique, comme le montre l'étude de l'influence réciproque de deux circuits électriques lorsque l'un d'eux peut se retourner sous l'influence du champ magnétique de l'autre, l'expérience de Stern et Gerlach nous apprend qu'il n'en n'est pas ainsi.

5 Les différents états quantiques

Lorsqu'il y a un ou plusieurs quanta en plus du quantum intrinsèque, ils donnent naissance à une quantité de mouvement additionnelle suivant un ou plusieurs des degrés de liberté.

1°) Considérons le mouvement engendré par le seul quantum intrinsèque, l'action se partage entre les deux degrés de liberté : la rotation et la translation, le moment cinétique orbital est donc de $\frac{1}{2}\hbar$ en valeur absolue. L'un des deux états « 1s » comme nous venons de le voir au *paragraphe 4* correspond à l'accélération de la rotation en présence d'un champ magnétique H, le nombre quantique appelé magnétique est $m = 1$ dans la notation utilisé en théorie de Dirac *tableaux I et II* ; l'autre état correspond au freinage avec $m = 0$. De même tous les autres états magnétiques peuvent se grouper ainsi par deux. Comprendre la succession des états quantiques se limite alors aux différentes manières d'augmenter le nombre des quanta d'action.

2°) Lorsqu'il y a un deuxième quantum d'action, celui-ci peut donner une quantité de mouvement radiale à l'électron, nous avons les états "2s" ; la composante radiale impose une augmentation de la masse inerte.

3°) Le deuxième quantum d'action peut être obtenu par augmentation de la masse inerte, le quantum d'action intrinsèque se partage de manière égale entre la rotation et la translation, il y a diminution de l'énergie cinétique sans composante radiale de la quantité de mouvement. La vitesse angulaire orbitale liée à celle de la rotation diminue. Le moment cinétique orbital augmente d'une unité sans modifier le nombre des états quantiques. Nous avons $k = \ell = 1$ qui est la seule unité permettant la rotation orbitale, elle est attachée à la rotation. Le moment cinétique ne peut pas être supérieur au nombre des quanta d'action, le moment cinétique est donc de $3/2\hbar$. Nous avons les deux états $2p_{1/2}$, ils correspondent au type II; pour ces deux états les propriétés magnétiques ne diffèrent de celles des deux états "1s" que par le facteur de Landé $g = k(k + \frac{1}{2})^{-1}$ [16] et [2], car seule la masse inerte a augmenté. Ce deuxième quantum d'action modifie les propriétés radiales de la fonction d'onde. L'unité flottante relation 20 de [2] appartient au nombre quantique ρ (voir *tableau 1*) qui détermine la partie radiale de la fonction d'onde.

Tableau 1. Les différents nombres quantiques dans le modèle de Dirac, leurs relations d'ordre et ν le nombre d'états de la sous-couche. Le type II correspond à la première sous-couche et le type I à la seconde. Le nombre quantique principal n , de rotation k , orbital ℓ , radial r , magnétique m ; le nombre ρ est introduit dans le degré des polynômes définissant les fonctions radiales composantes des solutions de l'équation de Dirac. Pour éviter toute confusion avec les couches np donnant des doublets nous utilisons la lettre grecque ρ plutôt que la lettre p utilisée par Louis de Broglie [7] et [2]. Les bornes du nombre m résultent de l'étude des solutions de l'équation de Dirac et sont vérifiées expérimentalement par les mesures de moments magnétiques [16].

$n \geq 1$	$\ell \leq n-1$	$r \leq n-1$	$n = \ell + r + 1$	ν
Type II ; première sous-couche	$k = \ell$	$\rho = r + 1$	$-(\ell-1) \leq m \leq \ell$	$2(\ell-1)$
Type I ; deuxième sous-couche	$k = -\ell - 1$	$\rho = r$	$-\ell \leq m \leq \ell + 1$	2ℓ

4°) Le deuxième quantum d'action peut encore être obtenu par augmentation de la masse inerte et diminution de l'énergie cinétique avec augmentation du nombre des quanta de rotation soit $(\ell + 1)$. Pour ces états, sous l'in-

fluence d'un champ magnétique, l'accélération de la rotation peut correspondre à un ou deux quanta et inversement pour le freinage. Dans ces états l'augmentation de la masse inerte est très légèrement supérieure à celle des états $2p_{1/2}$ et l'énergie cinétique très légèrement inférieure [10]. Les différents nombres magnétiques sont $m = 2$ et $m = -1$ pour $\mu_c = 3/2 \mu_B$ et $\mu_c = -3/2 \mu_B$ et $m = 1$ et $m = 0$ pour $\mu_c = 1/2 \mu_B$ et $\mu_c = -1/2 \mu_B$. Nous avons les quatre états quantiques $2p_{3/2}$, ils correspondent au type I.

Tableau II. Les couches s, p, d, f et les sous-couches correspondantes.

$s; \ell = 0$	$p; \ell = 1$		$d; \ell = 2$		$f; \ell = 3$	
$s_{1/2}$ $k = -1$	$p_{1/2}$ $k = 1$	$p_{3/2}$ $k = -2$	$d_{3/2};$ $k = 2$	$d_{5/2}$ $k = -3$	$f_{5/2}$ $k = 3$	$f_{7/2}$ $k = -4$

Tableau III. Les différents états quantiques 3d des deux sous-couches $3d_{3/2}$ et $3d_{5/2}$. Le nombre m qui définit la fonction d'onde. Le moment angulaire $u = [m-1/2]$ en unités \hbar , le facteur de Landé $g = k/(k+1/2)$ et le moment magnétique correspondant $= gu$ en magnétons de Bohr. Les éléments M avec le nombre d'électrons 3d. La place de l'élément M est telle que l'électron additionnel est supposé occuper l'état quantique de la colonne.

$3d_{3/2}$	$k = 2 \quad g = 4/5$			
	M	Sc	Ti	V
m	2	1	0	-1
u	3/2	1/2	-1/2	-3/2
μ	1.2	0.4	-0.4	-1.2
ν	1	2	3	4

$3d_{5/2}$	$k = -3 \quad g = 6/5$					
	M	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
m	3	2	1	0	-1	-2
u	5/2	3/2	1/2	-1/2	-3/2	-5/2
μ	3	1.8	0.6	-0.6	-1.8	-3
ν	5	6	7	8	9	10

5°) Les autres augmentations de l'action conduisent aux mêmes conséquences et expliquent la succession des différents états quantiques. En particulier la compréhension du remplissage des sous-couches 3d et 4f *tableaux III et IV*, tels qu'ils nous sont révélés par le calcul des moments magnétiques de différents composés [16], est une question intéressante qui permet de corroborer le modèle quantique. Nous pouvons considérer que l'état le plus stable d'une sous-couche est celui qui favorise les échanges dans le sens de la rotation en l'accélégrant, c'est donc celui ayant le moment cinétique maximum. L'état correspondant à la diminution d'une unité du nombre des quanta de rotation, apparaît par suite en second. Par récurrence nous interprétons de la même manière les autres états jusqu'à l'état $m = 1$, puis avec $m = 0$ la rotation est freinée par une unité de quantum et ainsi de suite jusqu'à sa valeur minimum rappelée dans le *tableau I*.

Tableau IV. Les différents états quantiques 4f des deux sous-couches $4f_{5/2}$ et $4f_{7/2}$. Les éléments Ln avec les caractéristiques quantiques de l'électron additionnel correspondant: le nombre m qui définit la fonction d'onde; le moment angulaire $u = [m-1/2]$ en unités \hbar et le moment magnétique correspondant $\mu = gu$ en magnétons de Bohr.

M	Ln	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm
$4f_{5/2}$:	m	3	2	1	0	-1	-2
$k = 3$	u	5/2	3/2	1/2	-1/2	-3/2	-5/2
$g = 6/7$	μ	2.14	1.29	0.43	-0.43	-1.29	-2.14

M	Ln	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
$4f_{7/2}$:	m	4	3	2	1	0	-1	-2	-3
$k = -4$	u	7/2	5/2	3/2	1/2	-1/2	-3/2	-5/2	-7/2
$g = 8/7$	μ	4.00	2.86	1.71	0.57	-0.57	-1.71	-2.86	-4.00

6 Conclusion

Ainsi nous avons pu compléter le modèle corpusculaire quantique. Dans ce modèle l'électron et le proton tournent autour l'un de l'autre et toujours en sens opposés ; parallèlement à l'axe de rotation il y a également un mouvement de translation. A ces deux mouvements est associé un quantum d'action qui se partage de manière égale entre la rotation et la translation, d'où les nombres demi-entiers pour les moments cinétiques et magnétiques. Les propriétés magnétiques quantiques apparaissent comme le reflet des accélérations ou décélérations possibles de la rotation de l'électron. Il en résulte que l'ensemble des états possibles relèvent bien d'une description corpusculaire ce qui semblait échapper jusqu'ici à la compréhension des expériences de Stern et Gerlach.

A la mémoire de Henri Oudet

En terminant ce travail je tiens à mentionner la mémoire de mon frère Henri de dix ans plus jeune que moi : c'est lui qui m'indiqua en 1968 que le magnétisme est avant tout une propriété relativiste. Sur cette remarque j'ai donc lu les articles originaux en commençant par le mémoire d'Einstein puis celui de Dirac dans l'espoir de comprendre la mécanique quantique. Henri était remarquablement à l'aise dans les développements mathématiques mais il manquait terriblement de contact avec l'expérience. Tous ceux qui l'on connu m'ont parlé d'un collègue attachant, qu'ils regrettent depuis qu'il nous a quitté en 1989.

7 Références

- [1] Einstein A., Ann. der Physik, 17, 891-921, 1905.
- [2] Oudet X., Ann. Fondation Louis de Broglie, 29, 493-512, (2004).
- [3] Sommerfeld A., Ann. Phys. 51, 1, (1916).
- [4] Oudet X., Ann. de Chim. Sci. Mat., 33, 435-468, (2008).
- [5] O. Stern, Z. Phys., 7, 249-253, (1911).
- [6] W. Gerlach and O. Stern, Z. Phys., 9, 349-352, (1922).
- [7] de Broglie L., L'électron Magnétique (théorie de Dirac) Hermann, Paris (1934),p237-240.
- [8] Dirac P.A.M., Proc. Roy. Soc. A117, 610-624, (1928).
- [9] Oudet X., Ann. Fondation Louis de Broglie, 22, 409-421, (1997).
- [10] Oudet X., Ann. Fond. Louis Broglie, 20, 473-490, (1995).
- [11] Oudet X, J. Appl. Phys, 79, 5416 (1996).
- [12] Curie P., J. de Phys., 3-ème série, 3, 393-415, 1894.
- [13] Uhlenbeck G.E. and Goudsmit S., Naturwissenschaften 13, 953, (1925).

- [14] Uhlenbeck G.E. and Goudsmit S., Nature 117, 264, (1926).
- [15] E. Stoner, "Magnetism and Matter" Methuen and Co. Ltd, 36 Essex Street W.C. London, (1934) voir chapitre VII.
- [16] Oudet X. et G. Lochak, J. Magn. Magn Mater. 65, 99-122 (1987).

Reçu le 22 septembre 2009, dernière révision 6 mai 2010.