Monde Quantique : Expérience de Stern et Gerlach

Publié le 15.09.09 | Par Hagop Demirdjian

En 1922, Otto Stern et Walter Gerlach mettent en place une expérience pour déterminer si le moment cinétique électronique L est quantifié comme le propose Sommerfeld. Pour cela ils envoient des atomes d'argent à travers l'entrefer d'un électroaimant, zone où règne un champ magnétique inhomogène.

1. Classique ou Quantique ?

En 1922, Otto Stern et Walter Gerlach mettent en place une expérience pour déterminer si le moment cinétique électronique **L** est quantifié comme le propose Sommerfeld. Pour cela ils envoient des atomes d'argent à travers l'entrefer d'un électroaimant, zone où règne un champ magnétique inhomogène.

Quel est le résultat attendu ? Dans la description classique, l'électron est une particule ponctuelle en rotation autour du noyau. Cela lui confère un moment magnétique $\vec{\mu}$ proportionnel à son moment cinétique $\vec{L}$: $\vec{\mu} = e/2m\vec{L}$. On peut montrer que si le gradient de champ est orienté suivant *Oz* dans l'entrefer, alors la force exercée sur les atomes est $\vec{F} = \mu_z \vec{grad}(B_z)$. Elle est orientée suivant l'axe *Oz* et on s'attend à voir les atomes dévier le long de l'axe *Oz*. Dans l'hypothèse classique, *L*, donc μ_z prend des valeurs continues et à l'entrée de l'entrefer la répartition des moments des atomes du jet est isotrope (toutes les valeurs de -μ à +μ sont réalisées). On s'attend donc à observer une tache centrée sur l'axe du jet et allongée suivant *Oz*.

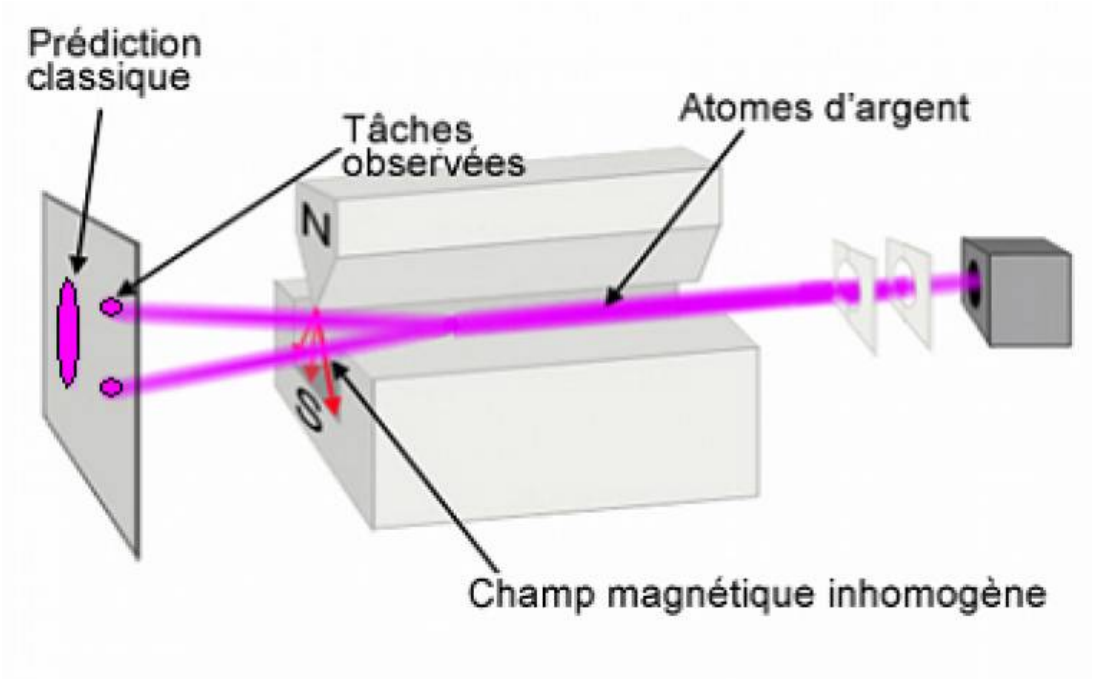


Figure 1 - Dispositif de l'expérience de Stern et Gerlach

Le résultat expérimental est complètement différent : on n'observe que deux petites taches symétriques (cf. figure 1). La conclusion de Stern et Gerlach est que la valeur de L est quantifiée et prend dans le cas de l'argent deux valeurs opposées. Nous savons aujourd'hui que cette conclusion est fausse (il faudra attendre quelques années avant de déterminer la valeur $L = 0$ pour l'argent). Toutefois, cette expérience met en évidence que la propriété mesurée est quantifiée.

2. Naissance du spin

Quelques années plus tard, la théorie quantique alors en plein essor prend désormais en compte la quantification de la norme du moment cinétique orbital $\vec{L}$ et celle d'une de ses projections, L_z, suivant la règle : $L_z = mh/2\pi$; $m \in [-l; +l]$; l étant un entier naturel.

Si on essaie de ré-interpréter l'expérience de Stern et Gerlach dans ce cadre nouveau, on aboutit encore à une impasse. En effet, si la déviation du jet est bien due à l'interaction B - L, alors on doit observer un nombre impair de taches ! Il faudra attendre encore pour obtenir une interprétation satisfaisante de l'expérience.

En 1925, pour rendre compte des spectres atomiques, notamment le dédoublement des raies spectrales du sodium, Georg Uhlenbeck et Samuel Goudsmith proposent une hypothèse : les électrons sont pourvus de "spin" (de l'anglais "to spin" , tourner). Ils formulent l'image classique d'un mouvement de rotation autour de l'électron autour de son axe, ce qui lui confère un moment magnétique intrinsèque[1]. L'électron est une particule de spin 1/2 et la projection du spin sur un axe ne prend pas de valeurs continues mais seulement deux valeurs qui sont multiples de la constante de Planck : +1/2 (spin up) et -1/2 (spin down).

3. Relecture de l'expérience

L'expérience de Stern et Gerlach sera ré-interprétée en terme de spin électronique en 1927. À cette date, la configuration de l'atome d'argent ($Z_{Ag} = 47$) est établie : $[1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10}] 5s^1$.

On sait également qu'une couche pleine ne contribue pas au moment cinétique orbital et que l'électron de l'état 5s a un moment cinétique orbital nul (pour une sous-couche s, on a $l = 0$), donc la seule contribution au moment magnétique est le spin des électrons. De plus chaque paire d'électrons occupant un état a un spin total nul. Il ne reste plus que le spin de l'électron occupant l'état 5s. Ce sont donc les deux états du spin qui correspondent aux deux taches observées au cours de l'expérience de Stern et Gerlach. C'est une nouvelle confirmation expérimentale de la valeur du spin électronique S = 1/2.

4. Conclusion

On peut remarquer que le spin électronique est introduit historiquement comme un paramètre supplémentaire indispensable pour interpréter des résultats expérimentaux. C'est donc un postulat de la théorie. En 1928, Paul Dirac formule une approche relativiste de la mécanique quantique au sein de laquelle l'existence découle des postulats de base.

5. Biographies



Figure 2 - Otto Stern

Licence : Domaine public

Otto Stern (1888-1969), physicien allemand, professeur à l'Université de Hambourg, à l'Institut de Technologie de Carnegie et à l'Université de Berkeley. Il utilise les faisceaux moléculaires pour mesurer les propriétés magnétiques des molécules et des protons et détermine ainsi les moments magnétiques de l'électron et du proton. Prix Nobel de physique en 1943.



Figure 3 - Walter Gerlach

Licence : Domaine public

Walter Gerlach (1889-1979), physicien allemand, professeur aux universités de Tübingen et Munich. Il effectue avec Otto Stern l'expérience qui porte leurs noms et qui montre que le moment magnétique de l'électron ne prend que des valeurs discrètes. Il apporte aussi une contribution à la physique du rayonnement, à la spectroscopie et à la physique quantique.



Figure 4 - Georg Uhlenbeck

Licence : Domaine public

Georg Uhlenbeck (1900-1988), physicien américain d'origine hollandaise, professeur aux universités d'Utrecht, Michigan et New York. Avec Goudsmith, il introduit le spin de l'électron pour expliquer les résultats des expériences de Stern et Gerlach. Il apporte une contribution à la physique atomique, à la physique nucléaire et à la mécanique quantique.



Figure 5 - Samuel Goudsmith

Licence : Domaine public

Samuel Goudsmith (1902-1978), physicien américain d'origine hollandaise, membre des MIT Radiation Laboratory et Brookhaven National Laboratories, professeur à l'Université de Reno. Avec son collègue Georg Uhlenbeck, pendant leur doctorat à l'université de La Haye, il émet l'hypothèse du spin de l'électron. Pendant la Seconde guerre mondiale, il travaille sur les ondes radar au Radiation Laboratory du MIT et est le chef d'une mission secrète d'évaluation du progrès allemand dans la construction de la bombe atomique.



Figure 6 - Paul Dirac

Licence : Domaine public

Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), physicien anglais, professeur à l'Université de Cambridge. Il montre que le formalisme de la mécanique quantique d'Heisenberg et celui de Schrödinger sont équivalents, introduit la relativité restreinte dans la mécanique quantique en postulant l'équation qui porte son nom (cette équation décrit le spin et les antiparticules), postule le monopole magnétique et propose la statistique quantique des fermions (appelée Fermi-Dirac). Prix Nobel de physique en 1933.

6. Bibliographie et ressources en ligne

1] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, et F. Laloë, Mécanique Quantique, volume I, Hermann, Paris, 1992, p 386-390.

CRÉDITS

AUTEUR(S)/AUTRICE(S)

Hagop Demirdjian

Docteur en chimie théorique, ancien élève de l'École Normale Supérieure Lyon, responsable éditorial du site CultureSciences-Chimie de 2004 à 2008.

MISE EN LIGNE

Nicolas Lévy

Professeur agrégé de chimie, responsable du Centre de Préparation à l'Agrégation externe de Chimie (École Normale Supérieure de Paris - Sorbonne Université - Université Paris-Saclay), responsable éditorial de CultureSciences-Chimie de 2008 à 2014.

NOTES

1 L'image classique n'a pas de sens à l'échelle quantique : il n'y a pas de mouvement de rotation de la fonction d'onde. Le spin est une caractéristique intrinsèque de l'électron, au même titre que sa masse et sa charge.