

Expérience de Stern et Gerlach

D'après les travaux originaux de :

Hagop Demirdjian

<http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/monde-quantique-experience-de-sterne-et-gerlach-771>

L. Beau



« SternGerlach2 » par Peng 1 July 2005 12:44 (UTC) — selbst gemacht --Peng 1 July 2005 12:44 (UTC). Sous licence CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons - <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:SternGerlach2.jpg#mediaviewer/File:SternGerlach2.jpg>

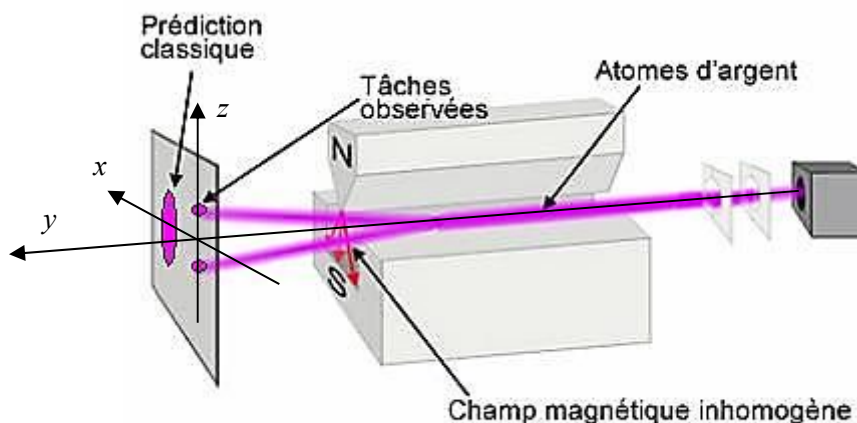
Classique ou quantique ?

En 1922, Otto Stern et Walter Gerlach mettent en place une expérience pour déterminer si le moment cinétique électronique \vec{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.

Quels 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{M} proportionnel à son moment cinétique \vec{L} : $\vec{M} = \frac{e}{2m} \vec{L}$. On peut montrer que si le gradient de champ est orienté suivant Oz dans l'entrefer, alors la force exercée sur les atomes est $\vec{R} = M_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \vec{e}_z$. 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, \vec{L} , donc M_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 $-M$ à $+M$ sont réalisées).

Dans le cadre de la physique classique, on s'attend donc à observer une tâche centrée sur l'axe Oy du jet et allongée suivant Oz .

Figure 1. Dispositif de l'expérience



Le résultat expérimental est complètement différent : on n'observe que deux petites tâches symétriques (cf. figure 1).

La conclusion de Stern et Gerlach est que la valeur de \vec{L} est quantifiée et prend dans le cas de l'argent deux valeurs opposées. Nous savons aujourd'hui que cette conclusion est fautive (il faudra attendre quelques années avant de prouver que $L = 0$ pour l'argent). **Toutefois, cette expérience met en évidence que la propriété mesurée est quantifiée.**

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 :

$$L_z = m h/2\pi ; m \in [-\ell; +\ell] ; \ell \in \mathbb{N}$$

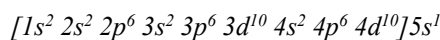
Si on essaie de réinterpréter l'expérience de Stern et Gerlach dans ce cadre nouveau, on aboutit encore à une impasse. En effet, si la déviation du jet est bien due à l'interaction B/L , alors on doit observer un nombre impair de tâches ! Il faudra attendre encore pour obtenir une interprétation satisfaisante 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 (cette image n'a pas de sens à l'échelle quantique).

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).

Relecture de l'expérience

L'expérience de Stern et Gerlach sera réinterprétée en terme de spin électronique en 1927. À cette date, la configuration de l'atome d'argent ($Z_{Ag} = 47$) est établie :



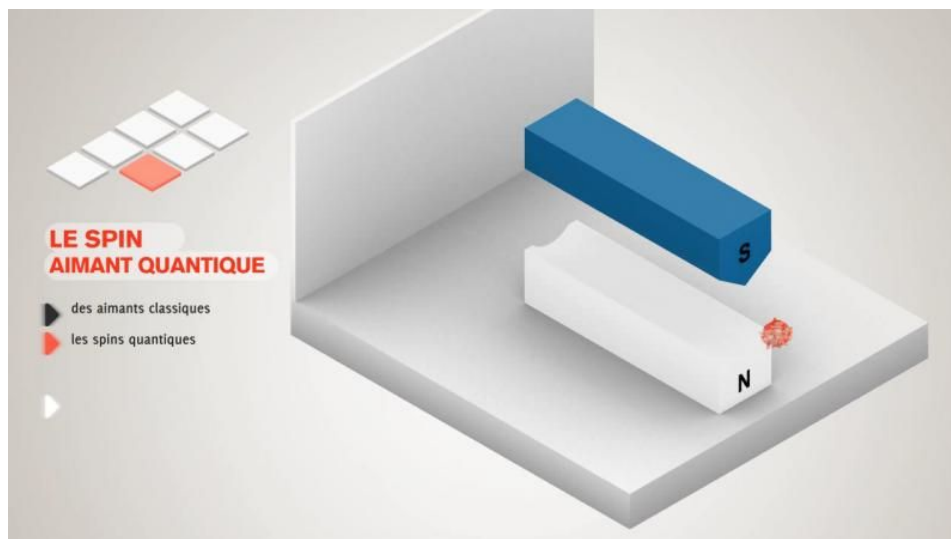
On sait également qu'une couche pleine ne contribue pas au moment cinétique orbital et que l'électron de l'état $5s$ a un moment cinétique orbital nul (pour une sous-couche s , on a $\ell = 0$), donc la seule contribution au moment magnétique est le spin des électrons. De plus chaque paire d'électrons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

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 du spin découle des postulats de base.

Prendre le temps de regarder la vidéo suivante de Julien Bobroff :

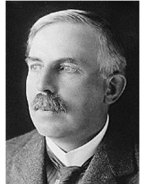


http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/00/Spin_quantique_et_exp%C3%A9rience_de_Stern_et_Gerlach.ogv
(Accessible depuis l'article « Expérience de Stern et Gerlach » de Wikipédia ou depuis le site toutestquantique.fr)

Annexe 1 - Biographies

Ernest Rutherford (1871 - 1937) est un physicien et chimiste néo-zélando-britannique, considéré comme le père de la physique nucléaire. Il découvre les rayonnements alpha, les rayonnements bêta ; il découvre aussi que la radioactivité s'accompagnait d'une désintégration des éléments chimiques, ce qui lui valut le prix Nobel de chimie en 1908. C'est encore lui qui mit en évidence l'existence d'un noyau atomique, dans lequel étaient réunies toute la charge positive et presque toute la masse de l'atome, et qui réussit la toute première transmutation artificielle.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford



Niels Henrik David Bohr (1885 - 1962) est un physicien danois. Il est surtout connu pour son apport à l'édification de la mécanique quantique, pour lequel il a reçu de nombreux honneurs. Il est notamment lauréat du prix Nobel de physique de 1922. Se basant sur les théories de Rutherford, il publie en 1913 un modèle de la structure de l'atome mais aussi de la liaison chimique. Cette théorie présente l'atome comme un noyau autour duquel gravitent des électrons, qui déterminent les propriétés chimiques de l'atome. Les électrons ont la possibilité de passer d'une couche à une autre, émettant un quantum d'énergie, le photon. Cette théorie est à la base de la mécanique quantique. Albert Einstein s'intéresse de très près à cette théorie dès sa publication. Ce modèle est confirmé expérimentalement quelques années plus tard.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Niels_Bohr



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.



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.



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.



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.



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.



Modèle de Rutherford (1911)

Il s'agit d'un modèle planétaire : les électrons, chargés négativement, tournent autour du noyau, chargé positivement, de rayon très faible devant sa distance aux électrons. L'atome d'hydrogène est modélisé par :

- Un électron de masse m_e et de charge $-e$ ayant une trajectoire circulaire autour d'un proton de charge $+e$ et nettement plus lourd que l'électron.
- Le proton exerce une force électrostatique attractive sur l'électron.

Modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène (1913)

Dans le cadre de la physique classique, une charge électrique accélérée rayonne de l'énergie. Le modèle de Rutherford conduit donc à des atomes instables, l'électron finissant par s'écraser sur le noyau. Niels Bohr améliore le modèle planétaire de Rutherford en ajoutant les contraintes suivantes :

- Les trajectoires possibles de l'électron sont celles qui satisfont à : $m_e r v = n \hbar$ où r est le rayon de la trajectoire, v sa vitesse et n un entier naturel.
- L'électron n'émet ou n'absorbe de l'énergie que lors d'un changement d'orbite.

Nombres quantiques

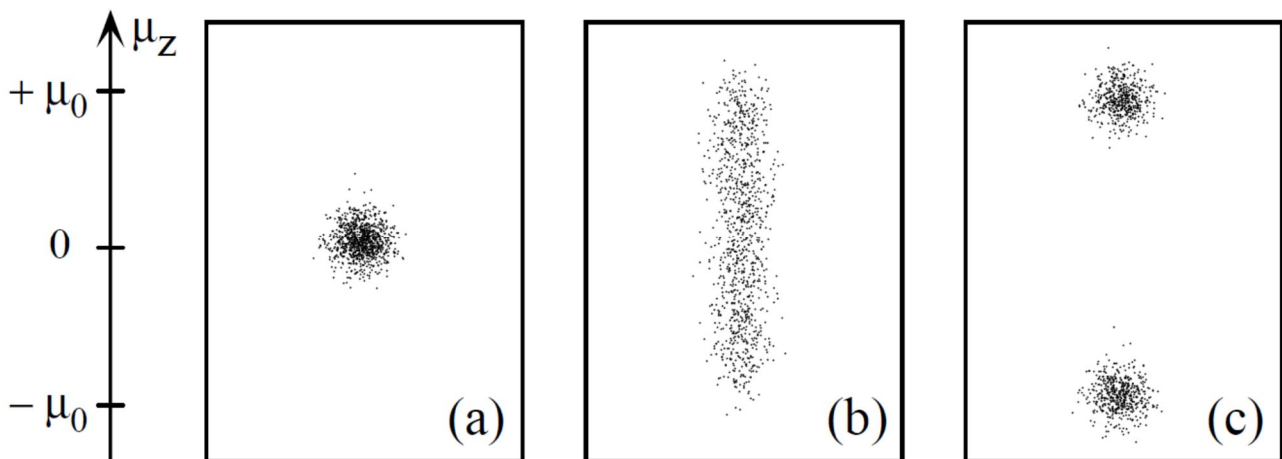
Nombre quantique principal n : nombre quantique entier naturel non nul. Dans la description non relativiste de l'atome d'hydrogène, les niveaux d'énergie ne dépendent que de n .

Nombre quantique secondaire (ou orbital) ℓ : nombre quantique entier naturel ($0 \leq \ell \leq n-1$) relié à la quantification du moment cinétique orbital \vec{L} par la relation $L^2 = \ell(\ell + 1)\hbar^2$.

Nombre quantique magnétique m : nombre quantique entier vérifiant $-\ell \leq m \leq \ell$ intervenant dans la quantification du moment cinétique : la projection suivant n'importe quel axe (Oz par exemple) d'un moment cinétique \vec{L} , caractérisé par un nombre quantique secondaire ℓ , vérifie $L_z = m \hbar$.

Compléments sur les nombres quantiques : http://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_quantique

Annexe 3 – Simulations de l'expérience de Stern et Gerlach



http://www.phys.ens.fr/~dalibard/Notes_de_cours/X_MQ_2003.pdf

Questions

1. Moments cinétique et magnétiques orbitaux – Justification de l'expression $\vec{M} = \frac{e}{2m} \vec{L}$

- 1.1. En adoptant le modèle de l'atome d'hydrogène purement classique de Rutherford, exprimer le moment cinétique orbital \vec{L} de l'électron en fonction de sa masse m_e , de sa vitesse v et du rayon r de l'orbite.
- 1.2. Exprimer le moment magnétique \vec{M} associé à la boucle de courant créé par le mouvement circulaire de l'électron en fonction de r , v et de la charge élémentaire e .
- 1.3. En déduire la relation $\vec{M} = \gamma \vec{L}$ où on exprimera γ .

2. Modélisation du champ \vec{B} créé par l'aimant – Justification de la forme $\vec{B}(x, z) = B_0 \vec{e}_z + a(-x\vec{e}_x + z\vec{e}_z)$

- 2.1. En utilisant la figure 1, représenter l'allure des lignes de champ entre les pièces polaires dans un plan parallèle à (xOz) .
- 2.2. Où le champ est-il le plus intense ?
- 2.3. Justifier que le champ magnétique ne possède que deux composantes B_x et B_z fonctions uniquement de x et z .
- 2.4. Vérifier à l'aide du tracé des lignes de champ que $B_z(x, z)$ est paire en x et que $B_x(x, z)$ est impaire en x .
- 2.5. Sachant que la dérivée d'une fonction paire est impaire (et réciproquement), que peut-on en déduire pour $\left(\frac{\partial B_z}{\partial x}\right)_{x=0}$ (i.e. dans le plan $x=0$ de la trajectoire) ?
- 2.6. Déduire de la question précédente et de l'équation de Maxwell-Ampère la valeur de $\left(\frac{\partial B_x}{\partial z}\right)_{x=0}$.
- 2.7. Montrer en utilisant un développement limité à l'ordre 1 de \vec{B} et l'équation de Maxwell-Flux que le champ peut se mettre sous la forme : $\vec{B}(x, z) = B_0 \vec{e}_z + a(-x\vec{e}_x + z\vec{e}_z)$.

3. Dispositif de déviation – Justification de l'expression $\vec{R} = M_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \vec{e}_z$

- 3.1. Pourquoi les atomes d'argent ne subissent-ils pas la force de Lorentz ?
- 3.2. Expliquer la nécessité d'un champ magnétique non uniforme dans l'expérience de Stern et Gerlach.
- 3.3. Expliciter les coordonnées de \vec{R} en fonction de des coordonnées de M_x , M_z , de $\frac{\partial B_x}{\partial x}$ et $\frac{\partial B_z}{\partial z}$.
- 3.4. Justifier, en invoquant un phénomène précis, que la moyenne temporelle (sur un temps à préciser) de R_x est nulle.
- 3.5. Conclure quant à l'expression finale de \vec{R} .

4. L'expérience de Stern et Gerlach

- 4.1. L'annexe 3 donne 3 simulations du résultat de l'expérience de Stern et Gerlach. Laquelle correspond au cas d'un champ magnétique uniforme ? Laquelle correspond à l'approche classique avec un champ magnétique inhomogène ?
- 4.2. La dernière simulation correspond à la véritable observation pour laquelle $\mu_0 = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ JT}^{-1}$. Montrer que cette mesure est compatible avec une quantification du moment cinétique de l'atome : $L_z = \pm \hbar$.