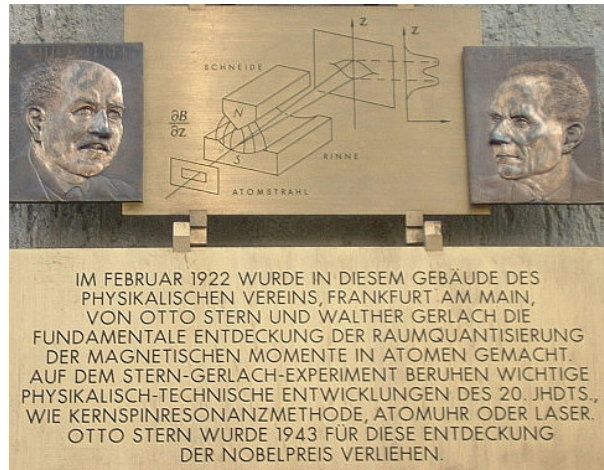


Analyse documentaire : Expérience de Stern et Gerlach

Document 1



Plaque commémorative de l'expérience de Stern et Gerlach à l'Institut de Physique de Francfort. Il y est inscrit : En février 1922, c'est dans ce bâtiment de l'Association de Physique de Francfort-sur-le-Main qu'Otto Stern et Walther Gerlach ont fait la découverte fondamentale de la quantification spatiale du moment magnétique de l'atome. Des évolutions importantes dans le domaine de la physique du XX^e siècle, telles que la méthode de la résonance magnétique nucléaire, l'horloge atomique ou le laser, reposent sur l'expérience de Stern et Gerlach. Le prix Nobel a été décerné à Otto Stern en 1943 pour cette découverte.

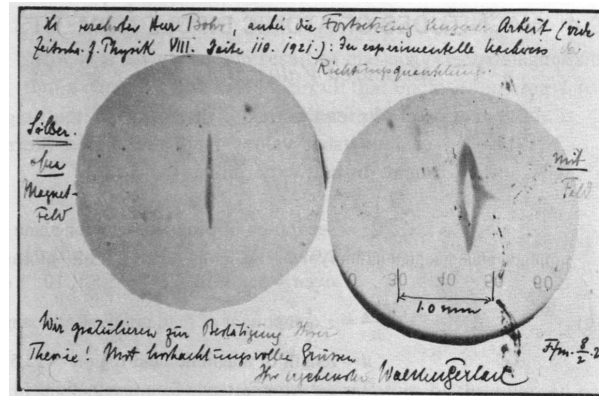
Document 2

En 1922, Otto Stern et Walter Gerlach mettent en place une expérience pour déterminer si le moment cinétique électronique \vec{L} est quantifié. 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 $\vec{\mu}$ proportionnel à son moment cinétique \vec{L} : $\vec{\mu} = \frac{e}{2m} \vec{L}$. On peut montrer que si le gradient de champ est orienté suivant Oz dans l'entrefer, alors la force exercée sur les atomes est $\vec{F} = \mu_z \overrightarrow{\text{grad}}(B_z)$. 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, \vec{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 $-\mu$ à $+\mu$ sont réalisées). On s'attend donc à observer une tâche centrée sur l'axe du jet et allongée suivant Oz .

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

Document 3



Photographie de la carte postale envoyée par Walther Gerlach à Niels Bohr. Sur les plaques photographiques de l'expérience, les taches sombres correspondent à des impacts d'atomes d'argent.

On lit sur cette carte postale :

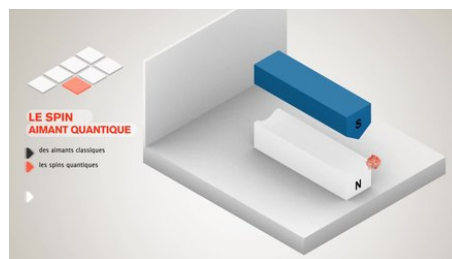
Cher M. Bohr,

Voici les suites d'un travail que nous avons publié (voir Zeitschrift für Physik, vol.8, p.110, 1921). Il s'agit de la preuve expérimentale de la quantification directionnelle. (A gauche) Argent, sans champ magnétique. (A droite) Avec champ magnétique.

Nous vous félicitons pour la confirmation de votre théorie!

Avec mes salutations respectueuses. Bien cordialement. Walther Gerlach.

Document 4



Capture de la vidéo du site <https://toutestquantique.fr/spin/> présentant l'expérience de Stern et Gerlach. Cette vidéo est accompagnée des explications :

Non seulement l'électron est à la fois un corps et une onde quantique, mais en plus, il porte une sorte de mini-aimant appelé spin.

Ce spin, comme toute propriété quantique, ne peut prendre que certaines valeurs, comme une boussole qui n'aurait droit qu'à certaines directions! À l'origine du magnétisme, le spin permet aussi de comprendre les liaisons chimiques entre atomes dans la matière. Il est aussi dans les disques durs des ordinateurs ou en imagerie médicale.

Document 5

Introduction du sujet XENS-PSI de l'année 2012

Première partie

Expérience de Stern & Gerlach

Le but de cette expérience est de montrer l'existence d'un moment magnétique atomique et de sa quantification. Dans cette expérience, Stern & Gerlach ont utilisé des atomes d'argent car toutes les couches électroniques sont pleines sauf la sous-couche $5s$ qui contient un électron. Comme les couches (et sous-couches) pleines ont un moment magnétique nul, le moment magnétique ne peut provenir que de l'électron $5s$. Si il y a moment magnétique propre associé à l'électron $5s$, on doit observer une déviation des atomes d'Ag ; leur position sur l'écran donnera une information sur le moment magnétique propre de l'électron et ses directions possibles.

L'argent est porté à haute température dans un four. Les atomes en s'évaporant sont éjectés par un trou dans la paroi du four avec une énergie cinétique proportionnelle à la température, $E_c = \frac{3}{2}k_B T$. Ce faisceau d'atomes passe par des fentes alignées avec l'orifice du four et l'écran, de sorte qu'il passe au milieu de l'entrefer de l'électroaimant.

Pour cette expérience, il est important d'avoir un gradient de champ magnétique élevé. Pour cela, on utilise un électroaimant dont les pièces polaires, représentées sur la FIG.1 par pôle $+$ et pôle $-$, sont réalisées en matériau ferromagnétique et sont saturées par l'application d'un champ magnétique produit par des bobines (non représentées ici).

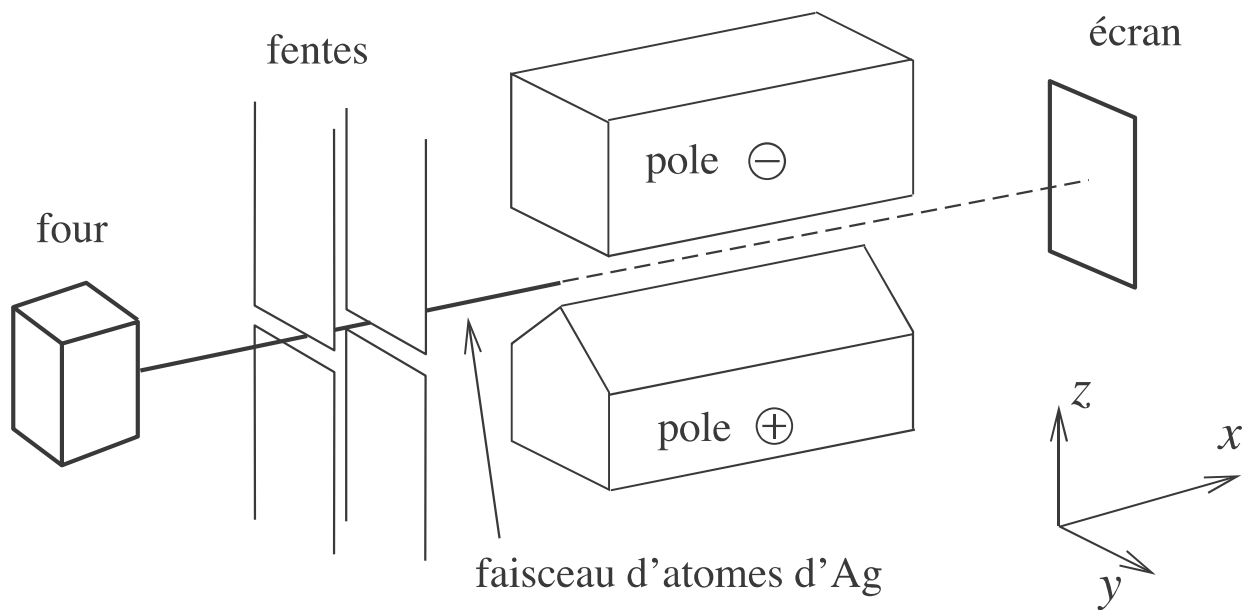


FIG. 1: Configuration de l'expérience historique. Les pièces polaires ont une longueur 2ℓ suivant x et l'écran est placé à une distance D derrière les pôles de l'électro-aimant.

Document 6

Paramètres de l'expérience de Stern et Gerlach

- longueur de l'électroaimant $l = 3,5$ cm
- distance entre l'électroaimant et l'écran : $D = \frac{l}{2}$
- gradient de champ magnétique $\frac{dB_z}{dz} \simeq 500$ T.m⁻¹
- pression dans l'enceinte $P \simeq 1$ mPa
- température dans le jet $T \simeq 1200$ K

Caractéristiques de l'argent

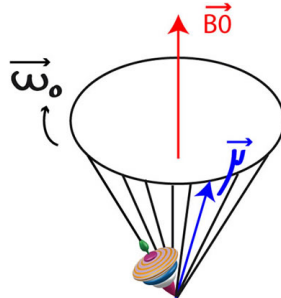
- masse molaire $M = 107$ g.mol⁻¹
- numéro atomique $Z = 47$
- rayon de l'atome $R_{Ag} = 160$ pm
- configuration électronique de l'atome d'argent dans son état fondamental $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^1 4d^{10}$ (il s'agit d'une exception à la règle de Klechkowsky)

Constantes fondamentales

- constante de Boltzmann $k_B = 1,38.10^{-23}$ J.K⁻¹
- charge élémentaire $e = 1,60.10^{-19}$ C
- masse de l'électron $m_e = 9,1.10^{-31}$ kg
- masse d'un nucléon $m_n = 1,7.10^{-27}$ kg

Document 7

En présence d'un champ magnétique externe \vec{B}_0 uniforme, constant et suffisamment important, les moments magnétiques $\vec{\mu}$ se mettent à tourner autour de la direction du champ magnétique externe \vec{B}_0 selon un angle donné. Leurs mouvements sont analogues à ceux des toupies et ils décrivent des cônes de révolution autour de l'axe de \vec{B}_0 .



L'apparition de ce mouvement de rotation des spins, sous l'influence du champ magnétique externe \vec{B}_0 , est appelé mouvement de précession.

Extrait de <https://www.info-radiologie.ch/precession-larmor.php>

Le couple subi par le dipôle est de la forme : $\vec{\Gamma} = \vec{\mu} \wedge \vec{B}$.

L'équation fondamentale de la dynamique donne $\frac{d\vec{\Gamma}}{dt} = \vec{\Gamma} = \vec{\mu} \wedge \vec{B}$.

Le rapport gyromagnétique γ est le rapport entre moment magnétique $\vec{\mu}$ et cinétique \vec{L} d'une particule, d'où $\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \gamma \vec{\mu} \wedge \vec{B}$.

Cette équation décrit un mouvement de précession à la pulsation de Larmor $\omega_0 = \gamma B$

Questions

1. Dans le modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène, on considère que l'électron est en mouvement circulaire uniforme autour du noyau en raison de l'interaction coulombienne. Proposer une explication qualitative au fait que l'on associe un moment magnétique à l'électron. Retrouver la relation $\vec{\mu} = -\frac{e}{2m_e}\vec{L}$ en calculant d'une part μ due à un modèle de spire de courant et \vec{L} d'autre part.
2. D'après le schéma de l'électroaimant et la conservation du flux, le champ magnétique est il plus intense près du pôle nord ou du pôle sud ? Dans quel sens est orienté $\vec{\text{grad}}(B_z)$?
3. Orienter correctement les photographies de l'expérience de Stern et Gerlach reproduites dans la carte postale en les positionnant par rapport au dispositif expérimental.
4. Au vu des deux résultats envoyés par carte postale, pourquoi Stern et Gerlach ont-ils pris un électroaimant et non un aimant permanent ?
5. La déviation Z des atomes est égale à $Z = M_z \frac{dB_z}{dz} \frac{lD}{3k_B T}$. Sur les résultats le grossissement du microscope est de x20 et le trait d'échelle est de 20 mm. Estimer à partir des données la valeur du moment magnétique atomique M_z .
6. Sachant que pour l'atome d'argent les moments magnétiques des électrons de cœur se compensent et au vu de sa configuration électronique, quels point commun y-a-t-il entre l'atome d'argent et l'atome d'hydrogène ?
7. Pour l'électron de la sous-couche 5s, que valent les nombres quantiques l et m ?
8. Si le moment magnétique associé à l'électron n'était dû qu'au moment cinétique orbital (lié à l et m), quel serait le résultat de l'expérience de Stern et Gerlach ? Que peut-on en conclure sur l'origine du moment magnétique de l'atome d'hydrogène ?
9. Qu'est-ce qui justifie que le noyau de l'atome d'argent puisse être considéré comme immobile ? Que peut-on en conclure sur l'origine du moment magnétique de l'atome d'hydrogène ?
10. En quoi l'expérience de Stern et Gerlach permet-elle d'affirmer que le spin est quantifié ?
11. On donne l'expression du libre parcours moyen l_0 (distance entre parcourue par une particule entre deux chocs avec d'autre particules) en fonction de la densité volumique d'atomes, n , et du rayon R d'un atome : $l_0 = \frac{1}{4\pi R^2 n}$. La vapeur d'argent est assimilée à un gaz parfait dans le volume de l'enceinte entre les deux électroaimant. On pourra donc utiliser la loi des gaz parfait pour déterminer n . Déterminer l_0 et en le comparant aux dimensions de l'enceinte justifier le choix d'une pression aussi faible.
12. Expliquer la phrase : "les composantes du moment magnétique de l'atome selon \vec{e}_x et \vec{e}_y subissent une variation sinusoïdale très rapide au cours du temps et sont en moyenne nulles". On s'aidera du phénomène de précession de Larmor des atomes d'argent dans l'enceinte formée par les électroaimants. Justifier cette affirmation en comparant la durée mise par les atomes pour traverser le dispositif et la période du mouvement de précession. On prendra comme rapport gyromagnétique de l'électron $\gamma = -\frac{e}{2m_e}$