

MSTAT3. Approche documentaire : l'expérience de Stern et Gerlach

I Documentation

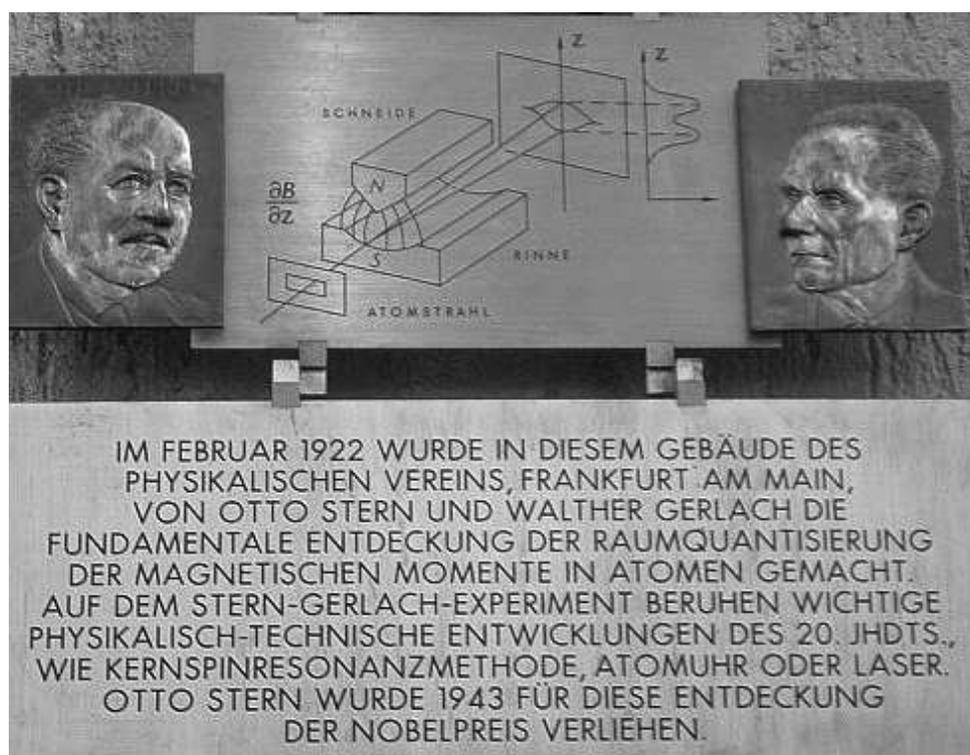


FIGURE 1 – Plaque commémorative de l'expérience de Stern et Gerlach (Institut de Physique de Francfort). Photographie publiée sous licence CC BY-SA 3.0 à l'adresse <http://en.wikipedia.org/wiki/File:SternGerlach2.jpg>

Traduction : 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 XXe 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.

I.1 Description de l'expérience et résultats

Le schéma du dispositif expérimental est représenté sur la figure 2. Pour la rendre plus lisible l'échelle n'a pas été respectée (la déviation du jet atomique est beaucoup plus faible).

Tout le dispositif est placé dans un vide poussé où règne une pression inférieure au millipascal. Des atomes d'argent s'échappent par un petit orifice d'une enceinte (la source) chauffée à haute température. Ils se déplacent en ligne droite jusqu'à une fente (F) qui sélectionne les atomes qui ont une vitesse parallèle à l'axe (Oy).

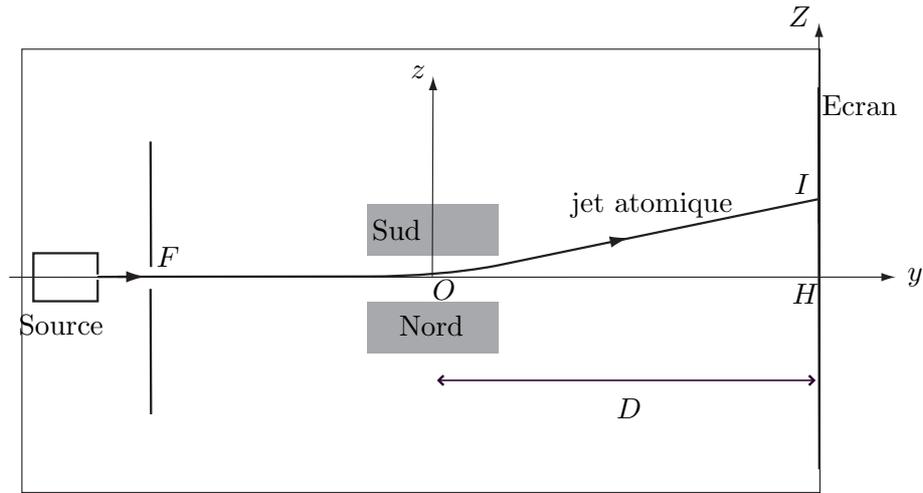
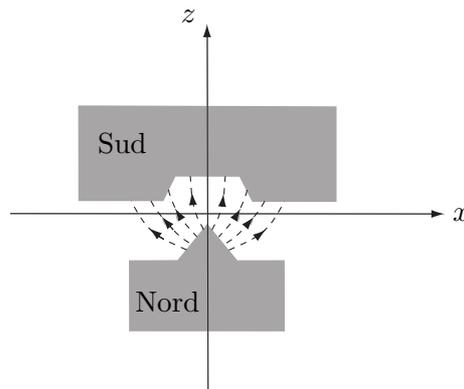


FIGURE 2 – Schéma du dispositif expérimental de Stern et Gerlach.

Le jet atomique pénètre alors dans l'entrefer d'un électroaimant dont les pièces polaires ont une forme cylindrique dont les génératrices sont parallèles à la direction (Oy) et dont la forme est choisie pour que le champ magnétique ne soit pas uniforme. L'allure de leur coupe dans le plan (xOz) est donnée sur la figure 3.

FIGURE 3 – Coupe de l'électro-aimant dans le plan (xOz) . Les lignes de champ magnétique sont représentées en tiretés.

Le jet atomique est dévié par ce champ inhomogène. Quand il sort de l'électroaimant, il continue en ligne droite jusqu'à un écran où sont repérés les impacts des atomes. Cet écran est refroidi pour éviter que les atomes ne se déplacent par la suite.

La figure 4 donne les résultats obtenus, issus de la publication originale de Stern et Gerlach (*Zeitschrift für Physik* 9 (1922)).

I.2 Action du champ magnétique sur les atomes

Le champ magnétique est approximativement de la forme : $\vec{B} = B_z(z) \vec{u}_z$.

Les atomes d'argent possèdent un moment magnétique \vec{M} , relié à leur moment cinétique \vec{L} par $\vec{M} = \gamma \vec{L}$ où γ est le rapport gyromagnétique. Placés dans un champ magnétique, ils possèdent l'énergie potentielle $\mathcal{E}_P = -\vec{M} \cdot \vec{B}$. Ils sont soumis à une force $\vec{F} = \overrightarrow{\text{grad}}(\vec{M} \cdot \vec{B})$ de moment, par rapport à la position A de l'atome $\vec{\Gamma}_A = \vec{M} \wedge \vec{B}(A)$.

Le théorème du moment cinétique appliqué à un atome, en son centre, donne :

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\Gamma} \Leftrightarrow \frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma \vec{B} \wedge \vec{M}$$

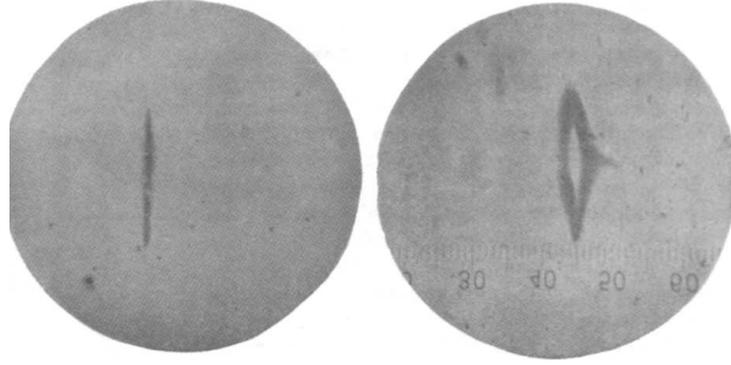


FIGURE 4 – Résultats originaux de l’expérience de Stern et Gerlach. La figure de gauche est obtenue sans champ magnétique, celle de droite avec champ magnétique.

On en déduit : $\vec{B} \cdot \frac{d\vec{M}}{dt} = 0$ donc l’angle entre les vecteurs \vec{B} et \vec{M} reste constant.

Le moment magnétique décrit un cône d’axe \vec{B} , il tourne autour du champ magnétique avec la vitesse angulaire : $\omega_0 = -\gamma B$. On appelle ce mouvement un mouvement de précession.

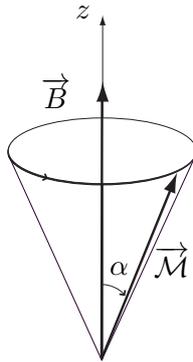


FIGURE 5 – Précession du moment magnétique autour du champ.

Les composantes du moment magnétique de l’atome selon \vec{u}_x et \vec{u}_y subissent une variation sinusoidale très rapide au cours du temps et sont en moyenne nulles. Tout se passe donc comme si l’atome était soumis à la force : $\vec{F} = \mathcal{M}_z \frac{dB_z}{dz} \vec{u}_z$.

Dans l’entrefer, l’atome est donc soumis à une force orientée selon \vec{u}_z . Cette force le dévie selon la direction \vec{u}_z . À la sortie de l’entrefer, il continue en ligne droite jusqu’à l’écran. La position du point d’impact I dépend de la vitesse des atomes, de la longueur ℓ de l’électroaimant, de la distance D entre l’électroaimant et l’écran, du gradient de la composante B_z du champ magnétique et de la composante \mathcal{M}_z du moment magnétique de l’atome. Tous les paramètres de l’expérience sont connus, la mesure de la position du point d’impact est une mesure de la composante \mathcal{M}_z .

I.3 Résultats et importance historique de l’expérience

Avant la traversée de l’entrefer, les atomes d’argent du jet atomique ont un moment magnétique orienté au hasard. Dans le cadre de la mécanique classique, la projection sur \vec{u}_z de ces moments magnétiques prend toutes les valeurs comprises entre $-\|\vec{M}\|$ et $+\|\vec{M}\|$. Le jet devrait donc former sur la plaque une seule tache symétrique par rapport au point H (voir figure 2). Les limites de cette tache correspondent aux valeurs maximale et minimale de \mathcal{M}_z . En fait, la fente F n’est pas infiniment fine et les vitesses des atomes ne sont pas toutes identiques, la tache présente

donc une certaine largeur autour du point correspondant à la déviation des atomes ayant pour vitesse la vitesse moyenne des atomes du jet.

Lorsque Stern et Gerlach réalisent l'expérience, ils n'obtiennent pas une zone uniforme comme le prévoit la théorie classique mais deux taches symétriques par rapport au point H (voir figure 4, comme le schématise la figure 6).

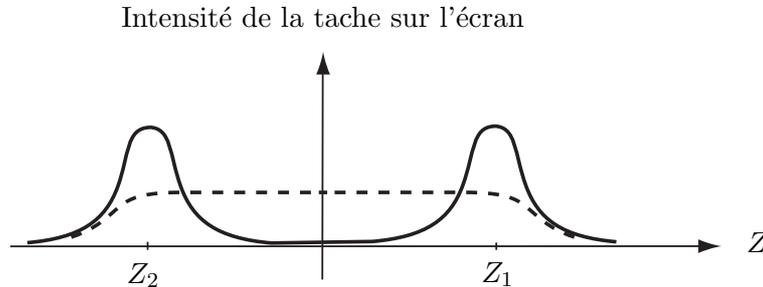


FIGURE 6 – Taches observées sur l'écran. La courbe en tirets représente la prévision classique, la courbe en traits pleins les taches réellement observées.

On en conclut que la composante \mathcal{M}_z du moment magnétique de l'atome d'argent ne peut prendre que deux valeurs, celles qui correspondent aux points d'impact de cote Z_1 ou Z_2 . On doit rejeter l'image classique d'un vecteur \vec{M} faisant un angle α avec le champ magnétique qui peut prendre toutes les valeurs possibles. Cet angle ne peut prendre que les valeurs 0 ou π .

Cette quantification spatiale du moment cinétique d'un atome était prévue par Sommerfeld en 1916 mais n'avait jamais été observée. L'expérience de Stern et Gerlach en a apporté la preuve expérimentale.

I.4 Données numériques

Paramètres de l'expérience de Stern et Gerlach

- longueur de l'électroaimant : $\ell = 3,5$ cm ;
- distance entre l'électroaimant et l'écran : $D = \ell/2$: dans l'expérience originale, la plaque recueillant les atomes est placée immédiatement à la sortie de l'aimant ;
- gradient de champ magnétique : $\text{dB}_z/\text{dz} \simeq 500$ T.m⁻¹ ;
- pression dans l'enceinte : $P \simeq 1$ mPa ;
- température dans le jet : $T \simeq 1000^\circ\text{C}$.

Caractéristiques de l'argent

- masse molaire : $M = 107$ g.mol⁻¹ ;
- numéro atomique : $Z = 47$;
- rayon de l'atome : $R_{\text{Ag}} = 160$ pm.

Constantes fondamentales

- constante de Boltzmann : $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ J.K⁻¹ ;
- charge élémentaire : $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C ;
- masse de l'électron : $m = 9,1 \times 10^{-31}$ kg.

II Questions

1. On définit le libre parcours moyen ℓ dans un gaz comme la distance moyenne que parcourt une molécule entre deux chocs successifs. On peut exprimer ℓ en fonction de la densité volumique d'atomes, n , et du rayon R d'un atome : $\ell = \frac{1}{4\pi R^2 n}$. La vapeur d'argent est assimilée à un gaz parfait. Déterminer la valeur numérique de ℓ et justifier le choix d'une pression aussi faible.
2. D'après la figure 3, le champ magnétique est-il plus intense près du pôle nord ou près du pôle sud ? Dans quel sens est orienté \vec{B}_z ?
3. Expliquer la phrase : « Les composantes du moment magnétique de l'atome selon \vec{u}_x et \vec{u}_y subissent une variation sinusoidale très rapide au cours du temps et sont en moyenne nulles ». Justifier cette affirmation en comparant deux durées caractéristiques pertinentes. On prendra pour le rapport gyromagnétique celui de l'électron $\gamma = -\frac{e}{2m}$.
4. Pourquoi Stern et Gerlach ont-ils pris un électroaimant et non un aimant permanent ?
5. La déviation Z est égale à : $Z = \mathcal{M}_z \frac{dB_z}{dz} \frac{\ell D}{3k_B T}$ (voir figure 2).
Sur la figure 4, le grossissement du microscope est de x20 et les graduations que l'on voit sont des millimètres.
Estimer à partir des données la valeur du moment magnétique atomique \mathcal{M}_z .
6. Combien d'électrons de valence comporte l'atome d'argent dans son état fondamental ? En admettant que seuls les électrons de valence participent au moment magnétique de l'atome, conclure quant au résultat de la question précédente.