

En 1922, Otto STERN et Walter GERLACH ont mis en place une expérience afin de 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 dirigé suivant une direction ( $z'$ ) orthogonale à la vitesse initiale des atomes.

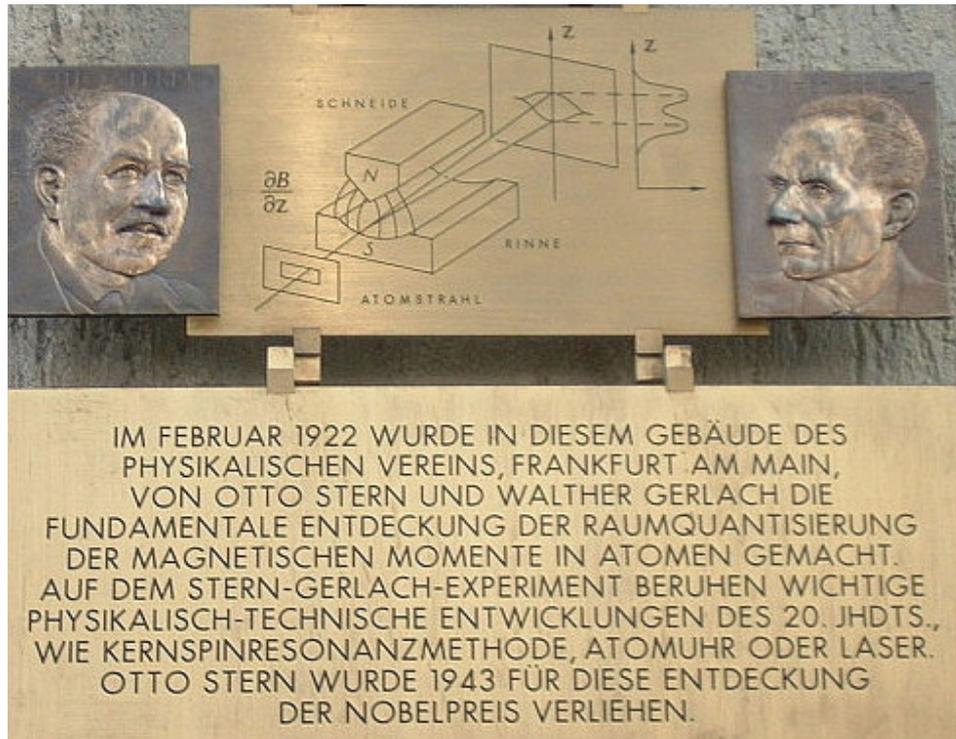


FIGURE 1 – Plaque commémorative de l'expérience portant l'effigie des deux physiciens allemands Otto STERN et Walther GERLACH au siège de la Physikalische Verein à Francfort-sur-le-Main (auteur : PENG)

Traduction de la plaque commémorative :

En février 1922, dans ce bâtiment de l'association de physique, à Francfort-sur-le-Main, Otto Stern et Walther Gerlach firent la découverte fondamentale de la quantification spatiale des moments magnétiques des atomes. Sur l'expérience de Stern-Gerlach reposent des développements physiques et techniques importants du 20<sup>e</sup> siècle, tels la résonance magnétique nucléaire, l'horloge atomique ou le laser. Pour cette découverte, Otto Stern reçut le prix Nobel en 1943.

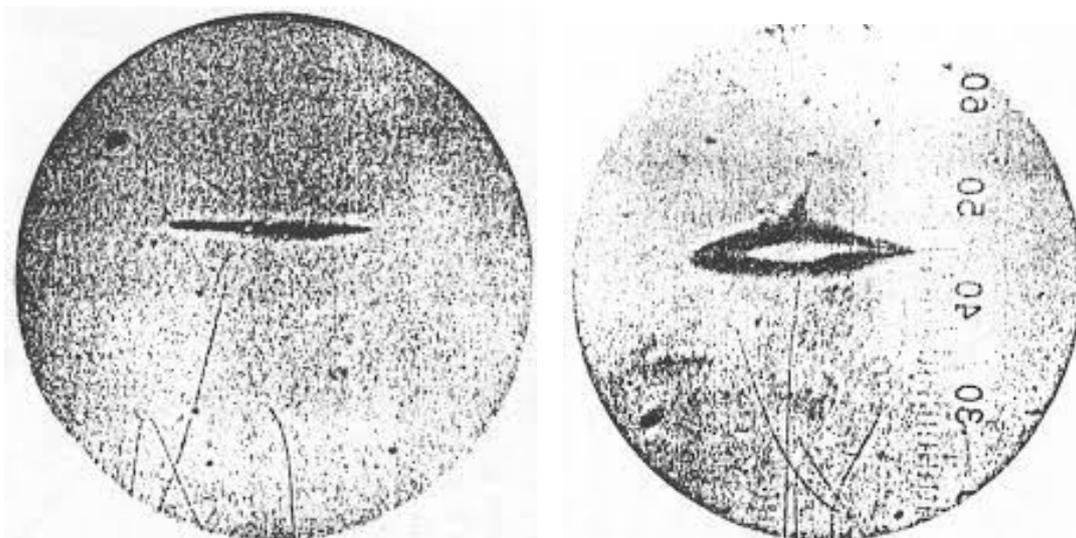


FIGURE 2 – Résultats obtenus sans et avec champ magnétique



## 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  $-e < 0$  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 celle qui satisfont à

$$m_e v r = n \hbar = n \frac{h}{2\pi}$$

où  $r$  est le rayon de la trajectoire circulaire,  $v$  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)  $\ell$  :** Nombre quantique entier naturel ( $0 \leq \ell \leq n - 1$ ) relié à la quantification du moment cinétique orbital  $\vec{L}$  :

$$L^2 = \ell(\ell + 1)\hbar^2$$

**Nombre quantique magnétique  $m_\ell$  :** Nombre quantique entier vérifiant  $-\ell \leq m_\ell \leq +\ell$  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  $\ell$ , vérifie

$$L_z = m_\ell \hbar$$

## Actions subies par un dipôle magnétique :

Un dipôle magnétique de moment dipolaire magnétique  $\vec{\mu}$  situé en un point  $M$  dans un champ magnétique extérieur  $\vec{B}(M)$  subit des actions dont la résultante  $\vec{F}$  et le moment  $\vec{\Gamma}$  en  $M$  sont :

$$\vec{F} = (\vec{\mu} \cdot \text{grad}) \vec{B}(M)$$

$$\vec{\Gamma} = \vec{\mu} \wedge \vec{B}(M)$$

Pour un champ magnétique selon (Oz) et ne dépendant que de  $z$  :  $\vec{F} = \mu_z \frac{dB_z}{dz} \vec{e}_z$

## Données physiques :

grandeur	symbole	valeur
célérité de la lumière dans le vide	$c$	299 792 548 m/s
constante de Planck	$h$	$6,626\,069\,57 \times 10^{-34}$ Js
charge élémentaire	$e$	$1,602\,176\,565 \times 10^{-19}$ C
masse de l'électron	$m_e$	$9,109\,382\,91 \times 10^{-31}$ kg
Numéro atomique de l'argent	$Z(\text{Ag})$	47

## Questions :

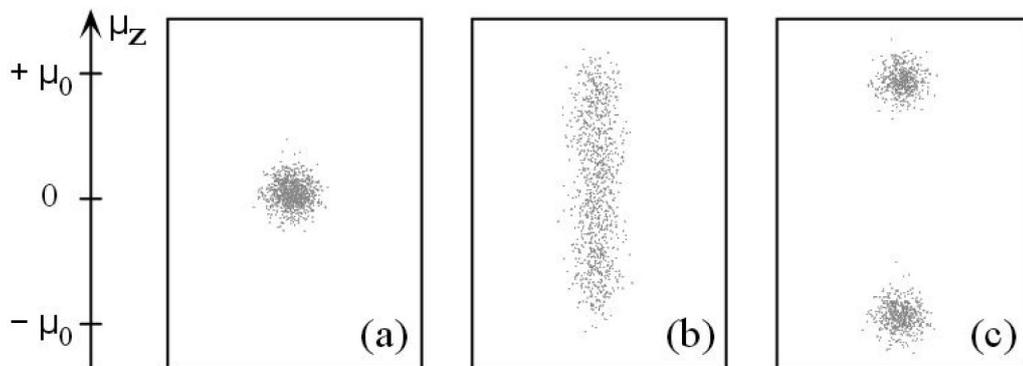
### Moment cinétique et moment magnétique orbitaux en physique classique

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.
2. Exprimer le moment magnétique  $\vec{\mu}$  associé à la boucle de courant créée par le mouvement circulaire de l'électron, en fonction de  $v$ ,  $r$  et de la charge élémentaire  $e$ .
3. En déduire la relation

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{L}$$

### Dispositif de Stern et Gerlach

4. Pourquoi les atomes d'argent ne subissent-ils pas de force de Lorentz ?
5. Expliquer la nécessité d'un champ magnétique non uniforme dans l'expérience de STERN et GERLACH.
6. Dans une approche classique, on suppose que les atomes d'argent portent un moment magnétique de norme  $\mu_0$  et que ces moments ont une direction aléatoire quand les atomes entrent dans la zone de champ magnétique. La figure ci-dessous donne trois simulations du résultat de l'expérience de STERN et GERLACH. Laquelle correspond au cas dans un champ magnétique uniforme ? Laquelle correspond à l'approche classique avec un champ magnétique inhomogène ?



7. La dernière simulation correspond à la véritable observation pour laquelle  $\mu_0 = 9,27 \times 10^{-24}$  J/T. Montrer que cette mesure peut être compatible avec une quantification du moment cinétique de l'atome :  $L_z = \pm \hbar$ .
8. Comme le montre la figure 2, le faisceau d'atomes d'argent pénétrant dans l'électroaimant présentait une extension spatiale selon (Ox). La figure 2 montre deux résultats obtenus sans ou avec champ magnétique. Pourquoi STERN et GERLACH n'ont-ils pas observé deux segments parallèles lorsque le dispositif de déviation est actif ?

### Analyse des résultats

9. Montrer que, dans son état fondamental, l'atome d'argent ne comporte qu'un électron de valence dont on donnera les nombres quantiques principal, secondaire et magnétique.
10. En admettant que seuls les électrons de valence contribuent au moment cinétique orbital, quelle(s) valeur(s) peut prendre la projection du moment cinétique orbital  $L_z$  pour l'atome d'argent ? Est-ce en accord avec le résultat de l'expérience de STERN et GERLACH ?
11. Quelle est l'interprétation finalement retenue pour expliquer les résultats trouvés par STERN et GERLACH ?