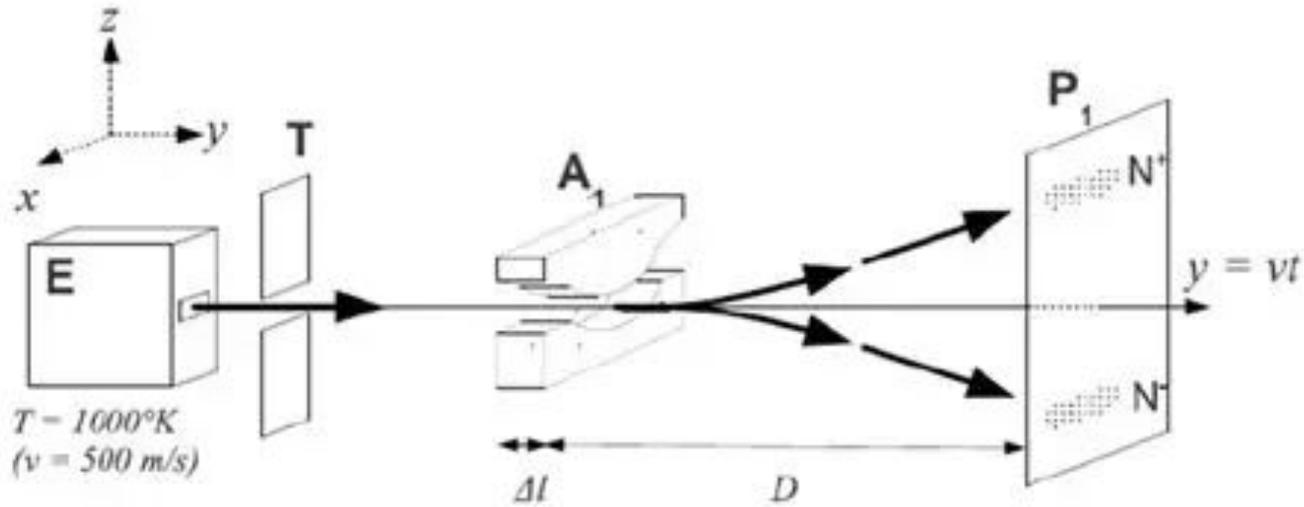


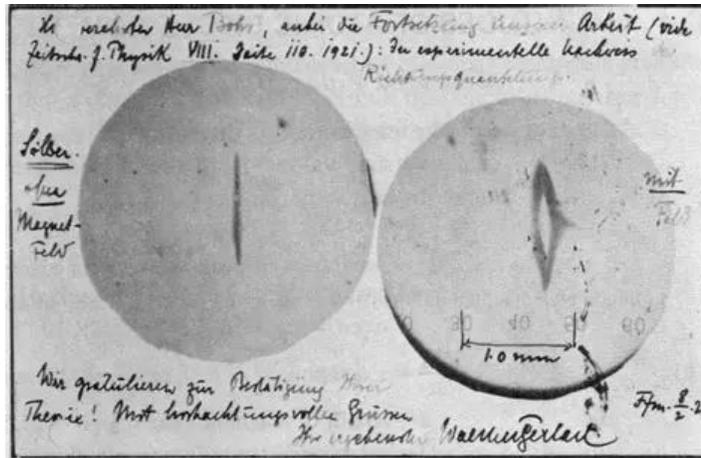


Otto Stern
1888-1969

1943

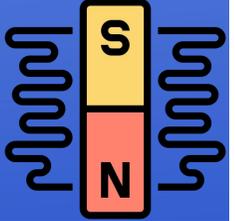


Walther Gerlach
1889-1979



Dipôles magnétiques : expérience de Stern et Gerlach

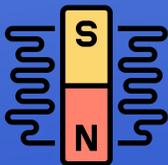
Niveau : Licence 3



Notion

- Seconde loi de Newton : Principe Fondamental de la Dynamique (abrégé en PFD), Théorème du moment cinétique (abrégé en TMC).
- Introduction à la mécanique quantique : longueur d'onde de de Broglie, notion d'espaces de Hilbert, observables, postulats de la mécanique quantique.

Dispositif expérimental



Taille de la fente (D) d'entrée : $b = 1 \text{ mm}$

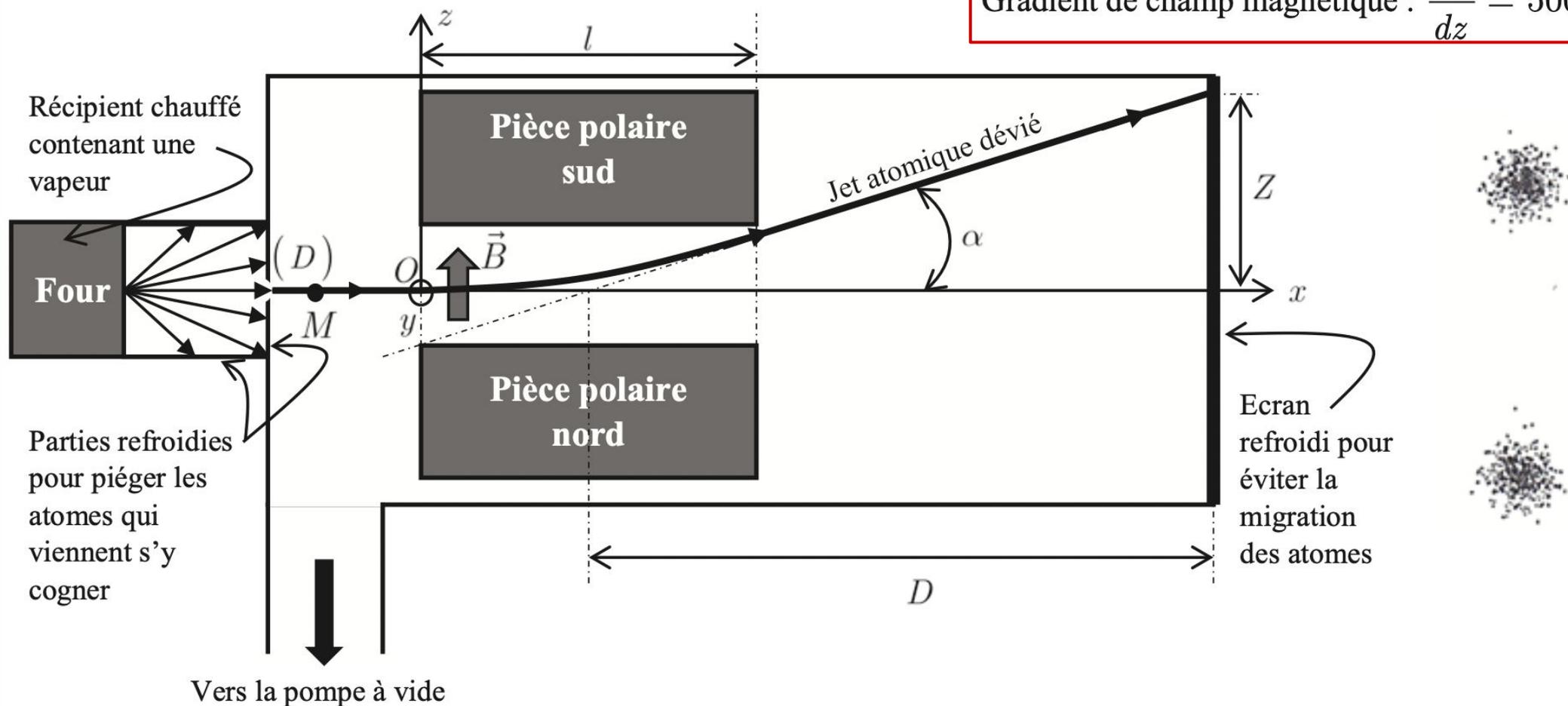
Longueur de l'électroaimant : $l = 3,5 \text{ cm}$

Distance entre le milieu de l'électroaimant et l'écran : $D = 1,8 \text{ cm}$

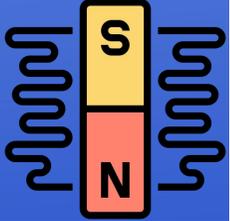
Pression dans l'enceinte : $P = 1,0 \text{ mPa}$

Température du jet à la sortie du four : $T = 1\,270 \text{ K}$

Gradient de champ magnétique : $\frac{dB}{dz} = 500 \text{ T.m}^{-1}$



Propriétés des dipôles magnétiques

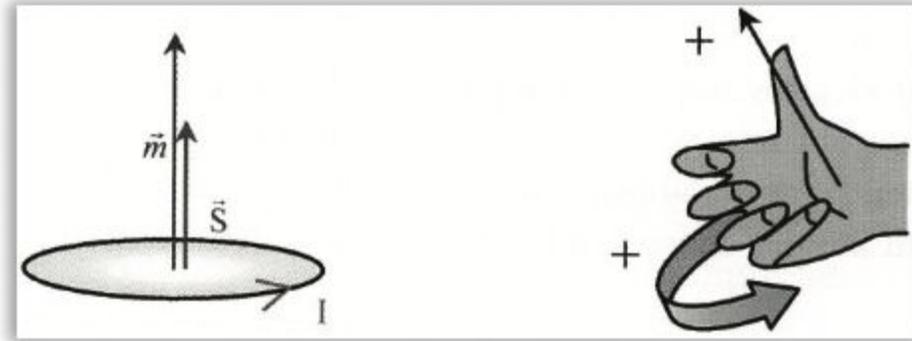


Un dipôle magnétique est caractérisé par son **moment magnétique** \vec{m} . Pour une spire de courant, ce moment magnétique s'écrit :

$$\vec{m} = I\vec{S}.$$

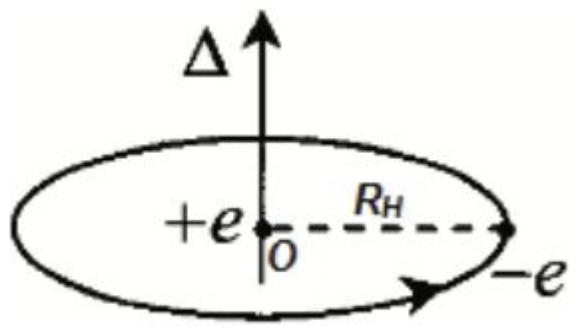
Plongé dans un champ magnétique, le dipôle magnétique subit au premier ordre un couple

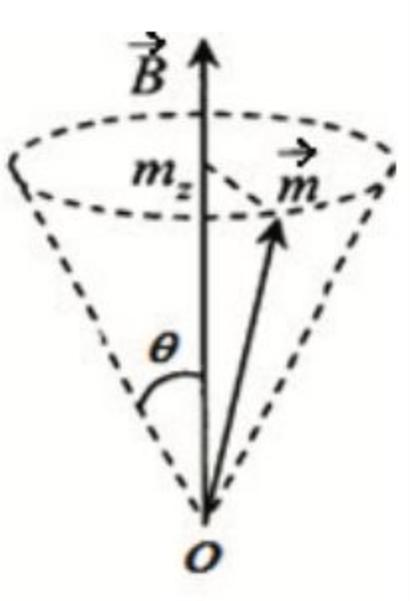
$$\vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B} \text{ et possède une énergie potentielle } E_p = -\vec{m} \cdot \vec{B}.$$

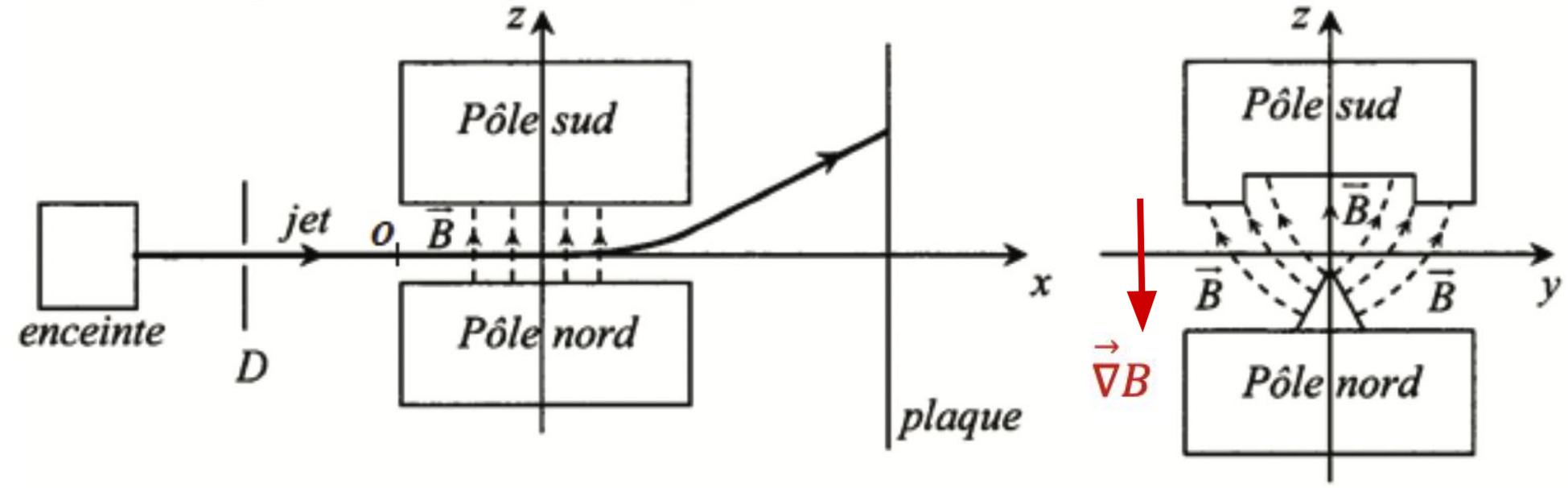


Les atomes d'argent sont porteurs d'un moment magnétique noté \vec{m} dont la norme est du même ordre de grandeur que celle du magnéton de Bohr μ_B associé à l'atome d'hydrogène.

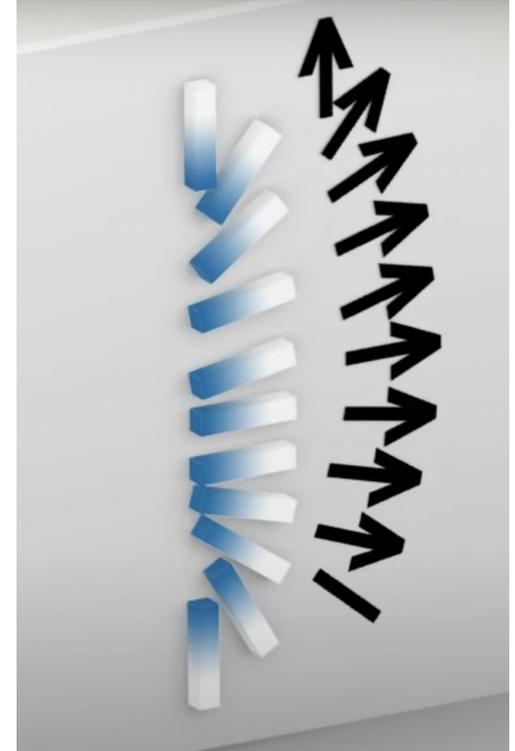
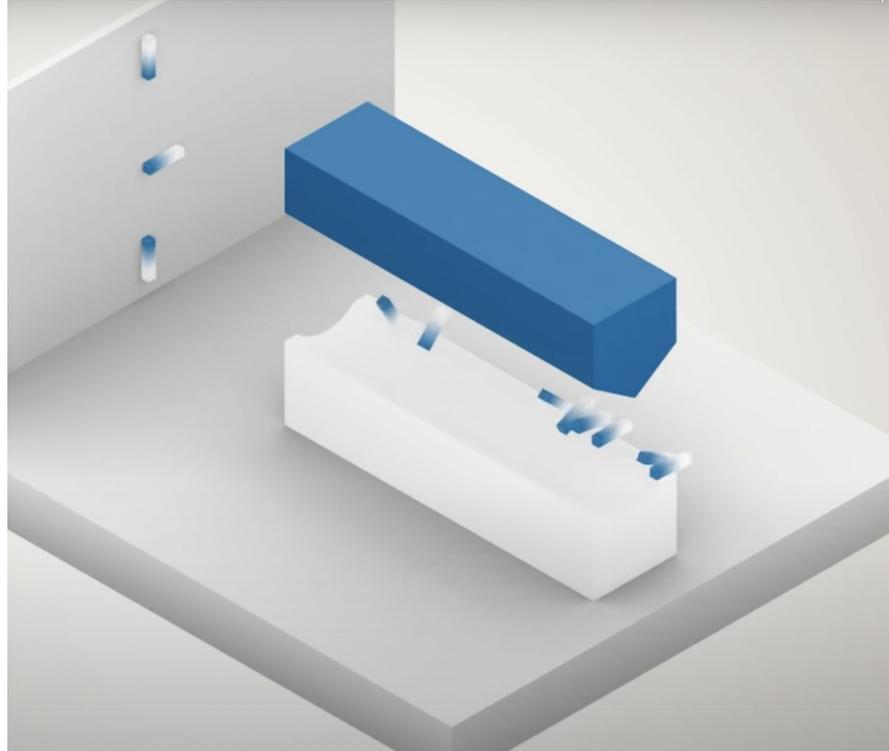
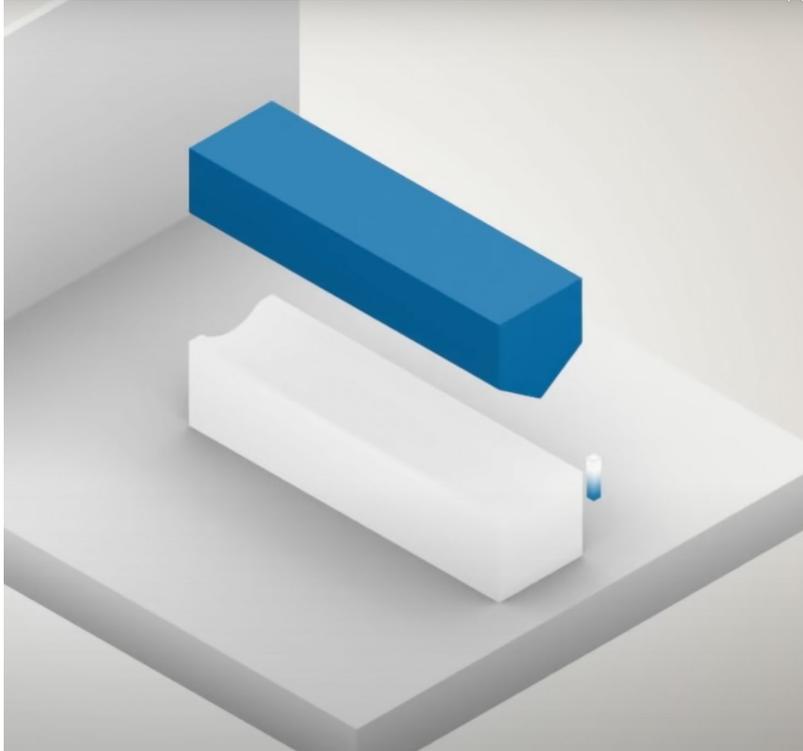
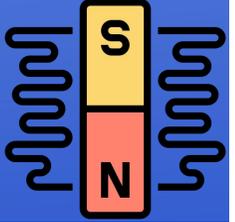
$$R_H = 53 \text{ pm}$$

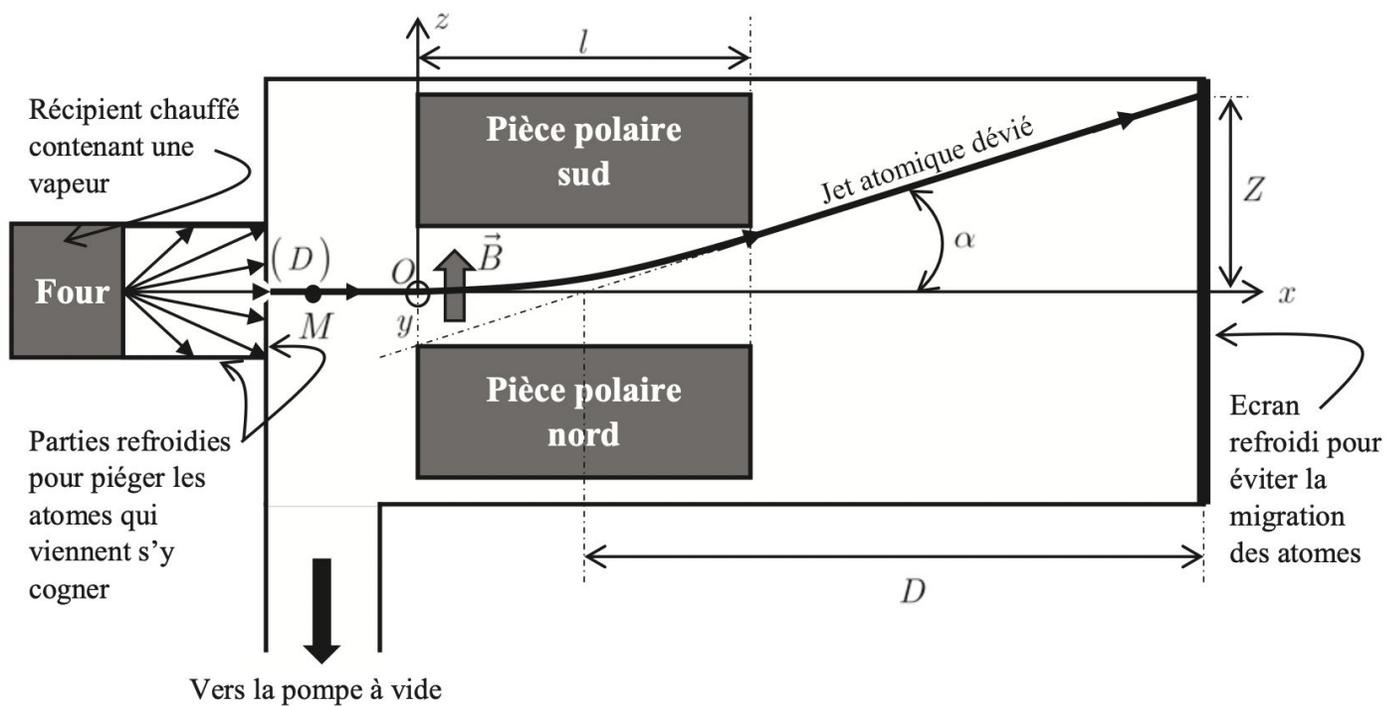




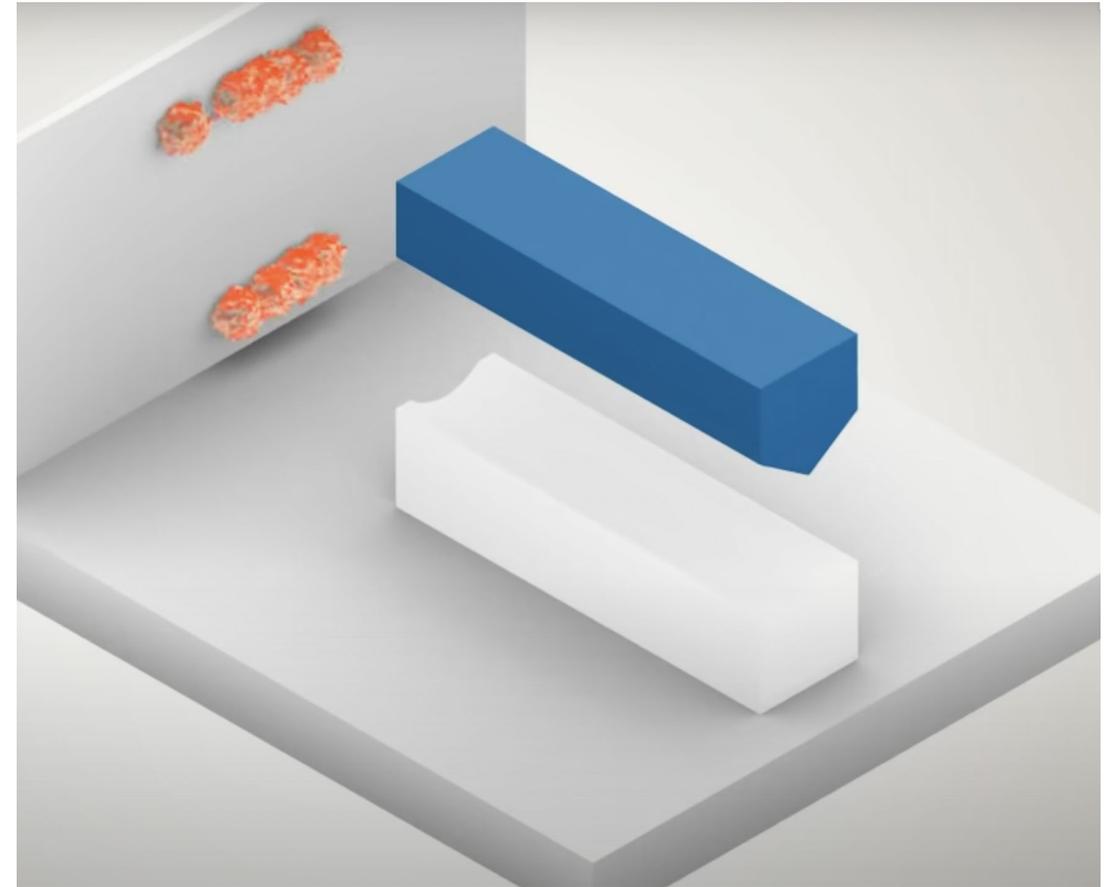
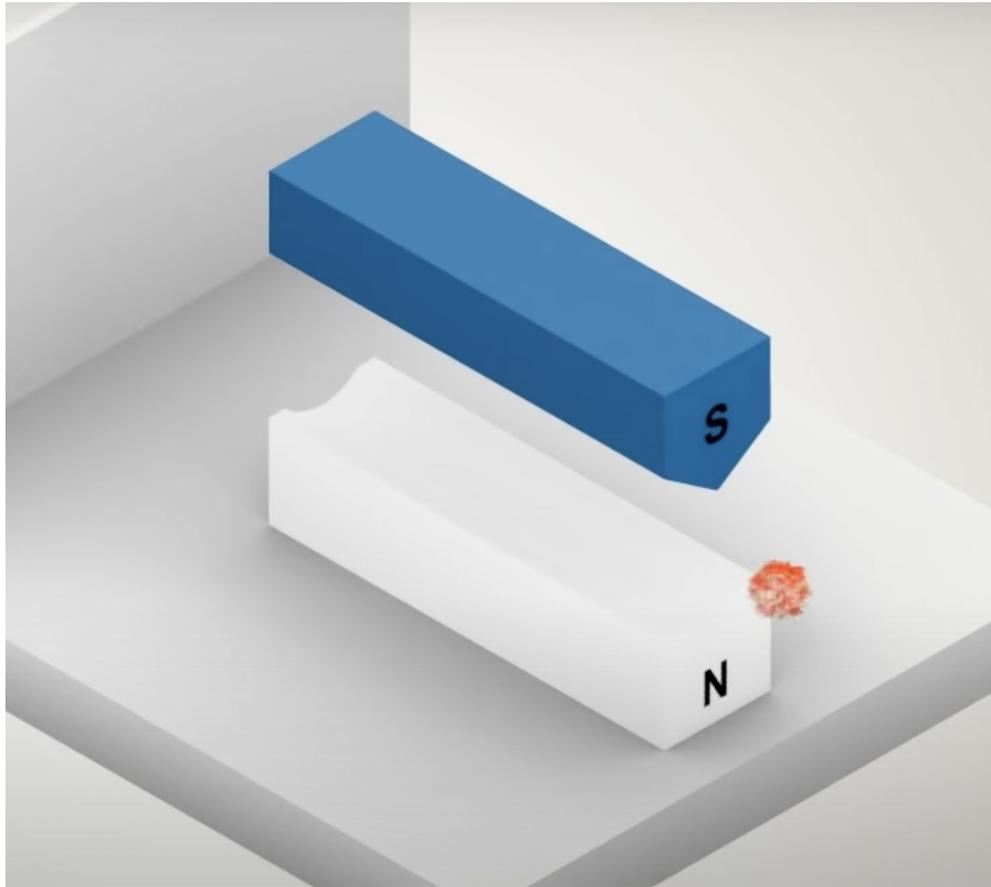
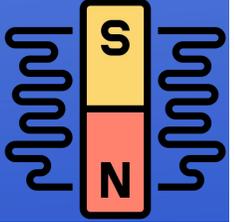


Résultat classique attendu





Résultat observé



Déflexion observée

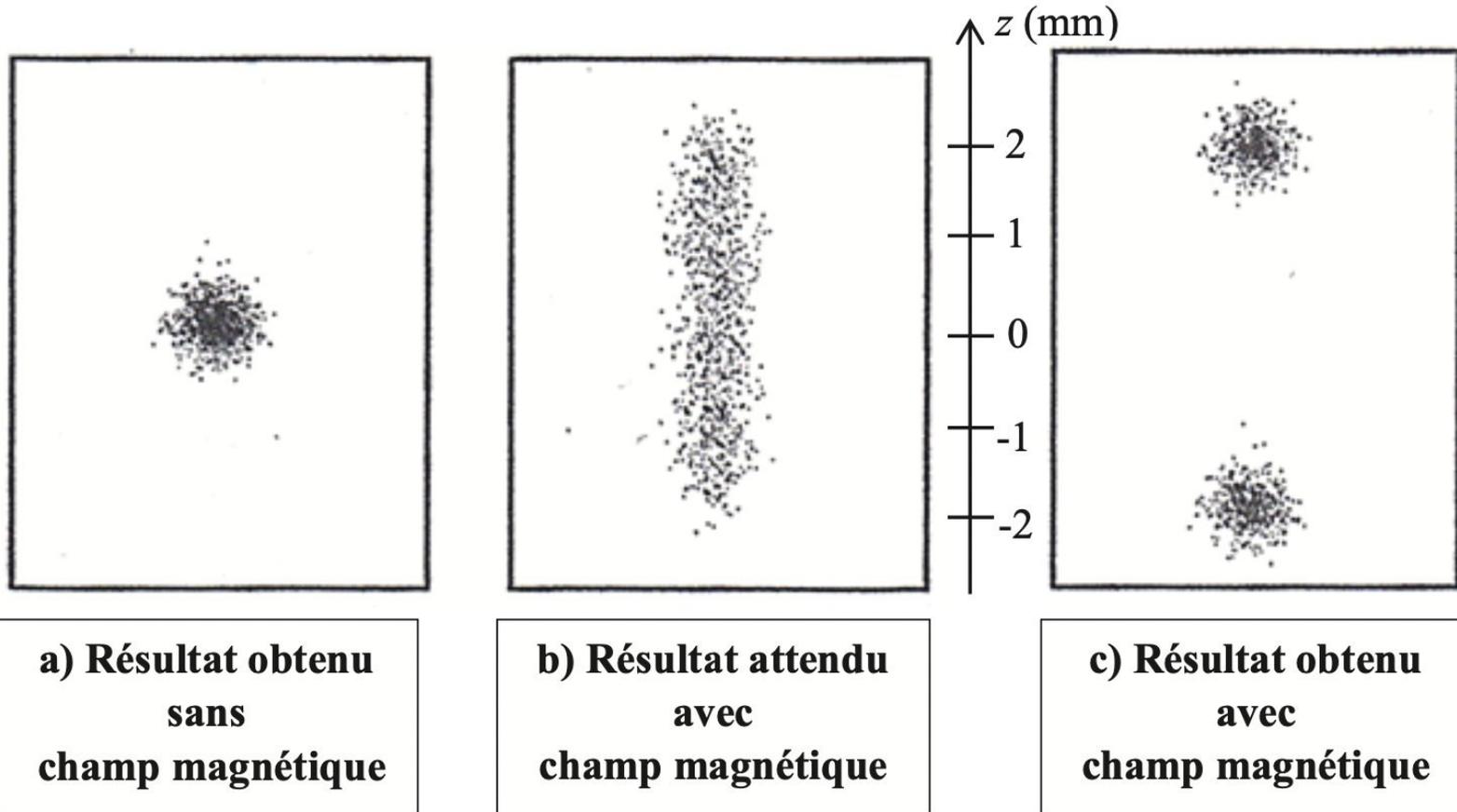
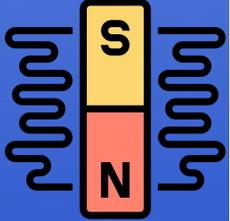
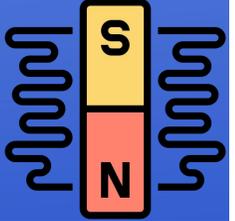


Figure A3 - Image obtenue à l'aide d'un microscope de grossissement x 20

Quantifier les degrés de liberté externes ?

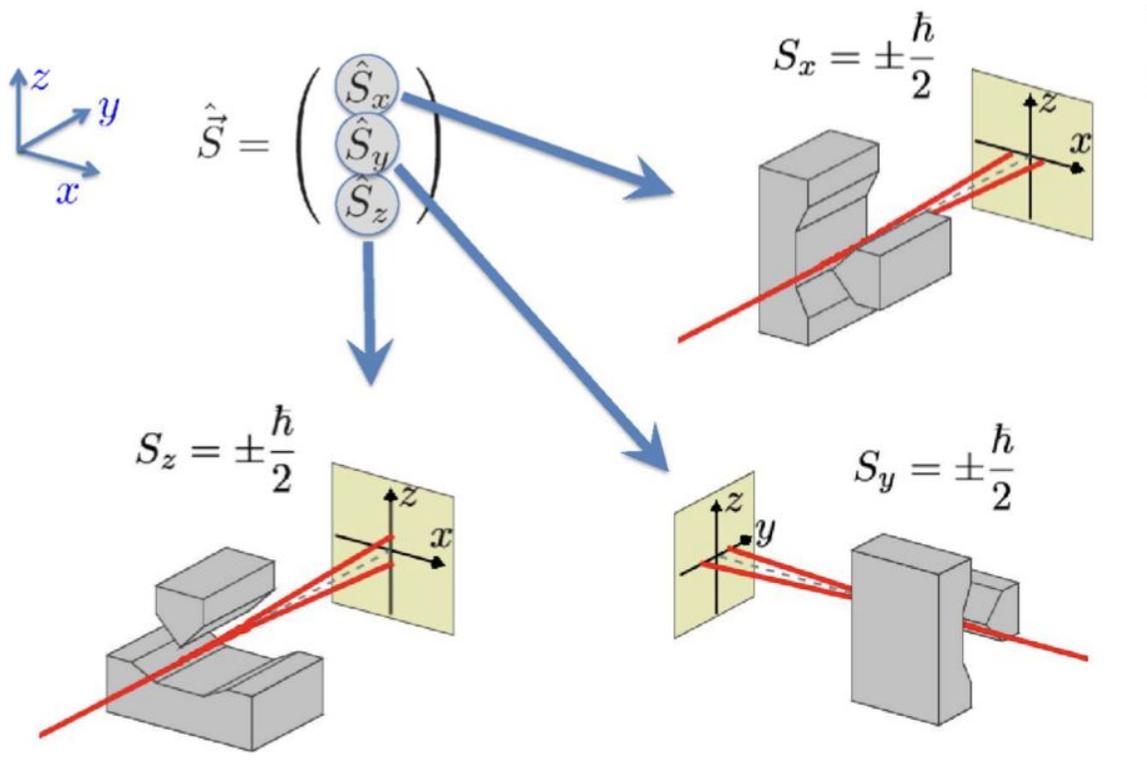


En considérant les atomes comme des paquets d'onde

$$\Delta z \Delta p_z \geq \hbar$$

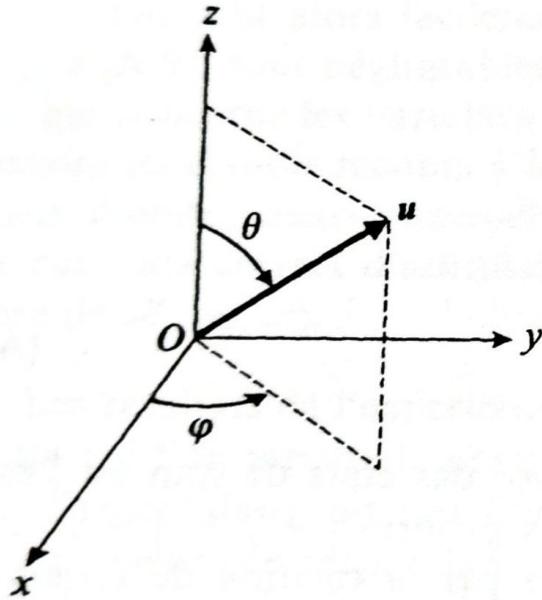
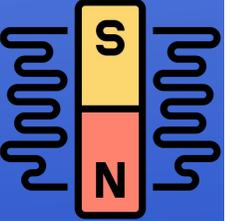
$$\Delta z \Delta v_z \geq \frac{\hbar}{m_{Ag}}$$

$$\Delta z \Delta v_z \approx 1 \text{ mm} \times 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \geq \frac{\hbar}{m_{Ag}} \approx 3,7 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$



$$[\hat{S}_x, \hat{S}_y] = i\hbar\hat{S}_z \quad [\hat{S}_y, \hat{S}_z] = i\hbar\hat{S}_x \quad [\hat{S}_z, \hat{S}_x] = i\hbar\hat{S}_y$$

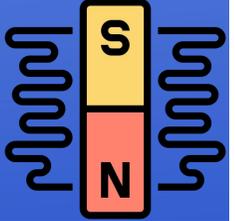
L'observable de spin



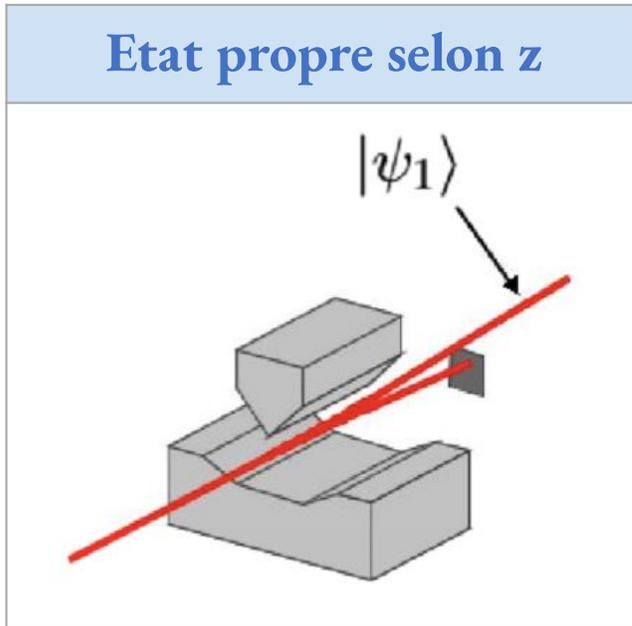
$$\begin{aligned}\mathcal{S}_u &= \mathcal{S} \cdot \mathbf{u} = \mathcal{S}_x \sin \theta \cos \varphi + \mathcal{S}_y \sin \theta \sin \varphi + \mathcal{S}_z \cos \theta \\ &= \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta e^{-i\varphi} \\ \sin \theta e^{i\varphi} & -\cos \theta \end{pmatrix}\end{aligned}$$

$$\begin{cases} |+\rangle_u = \cos \frac{\theta}{2} e^{-i\varphi/2} |+\rangle + \sin \frac{\theta}{2} e^{i\varphi/2} |-\rangle \\ |-\rangle_u = -\sin \frac{\theta}{2} e^{-i\varphi/2} |+\rangle + \cos \frac{\theta}{2} e^{i\varphi/2} |-\rangle \end{cases}$$

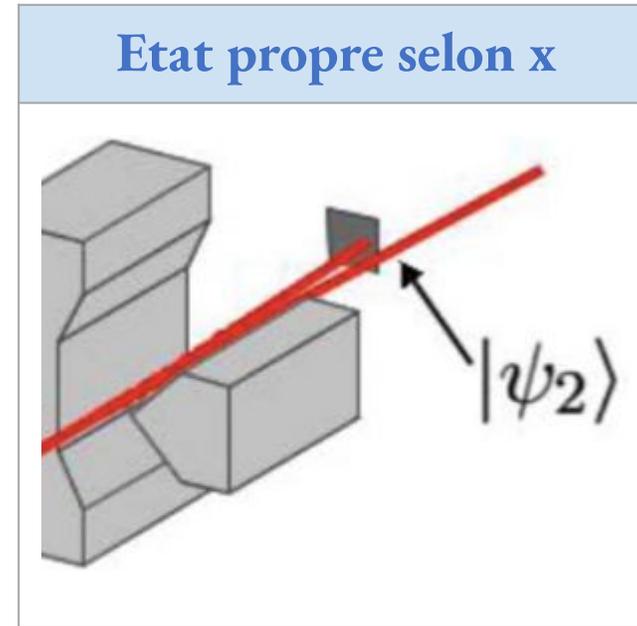
Préparation des états propres



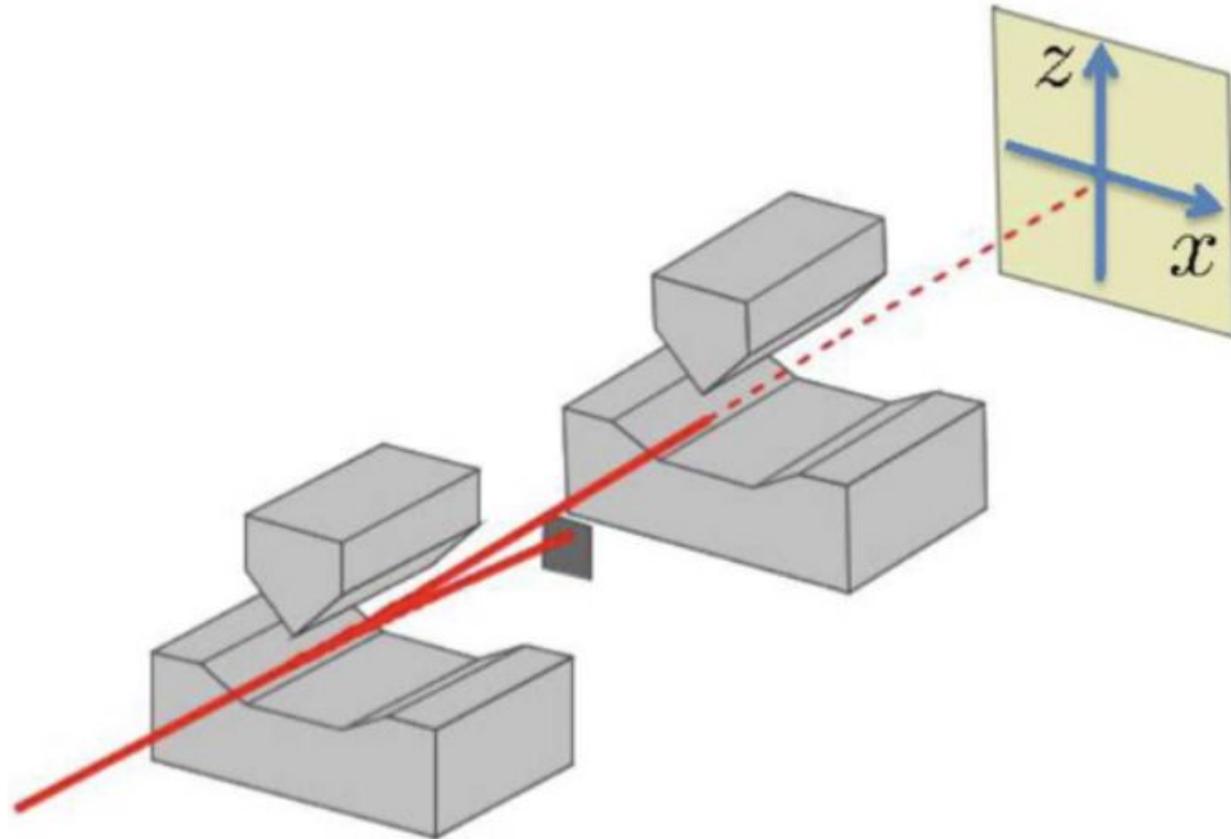
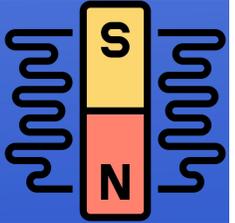
Etat propre selon z



Etat propre selon x

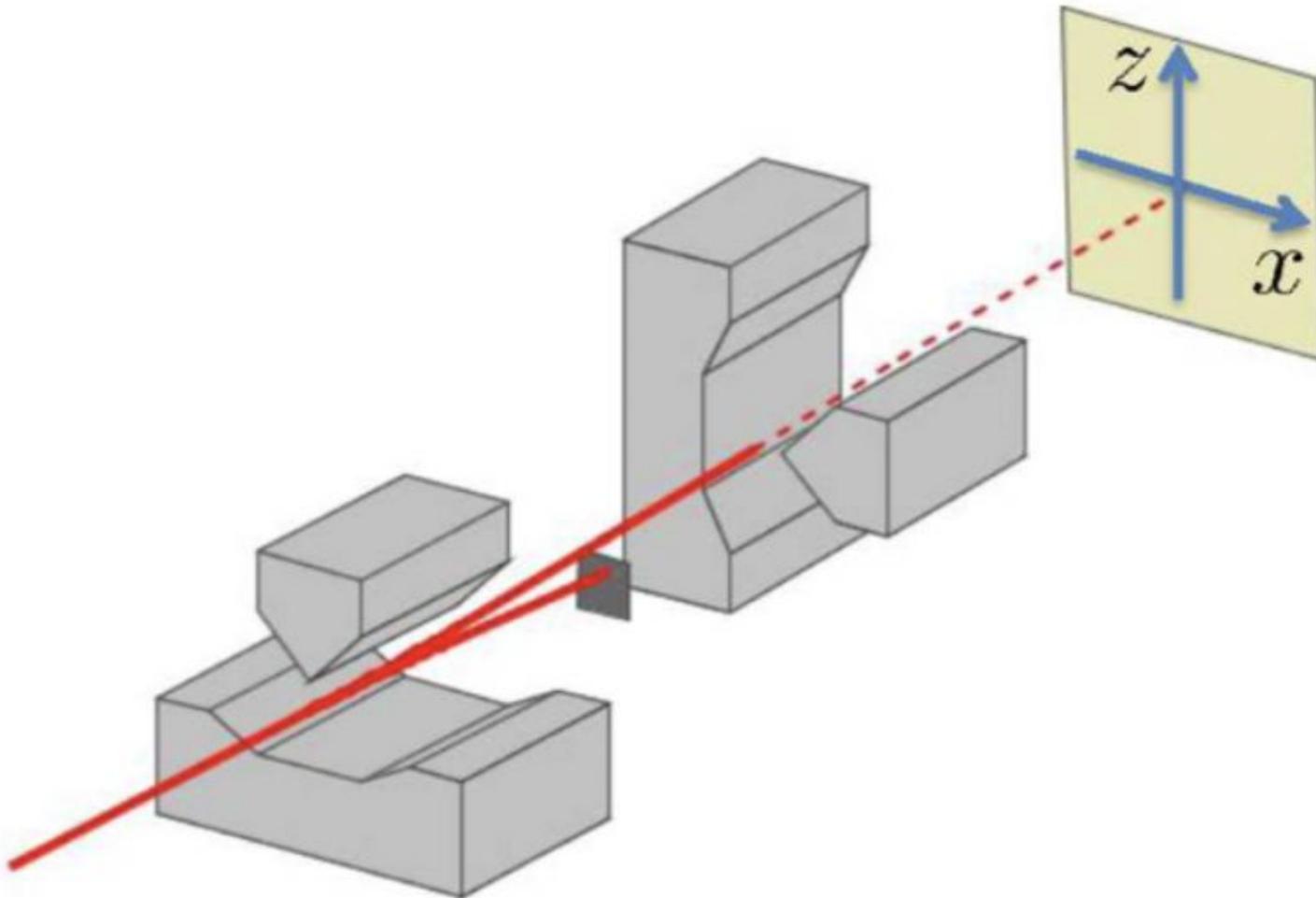
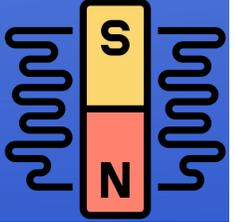


Mesure de spin



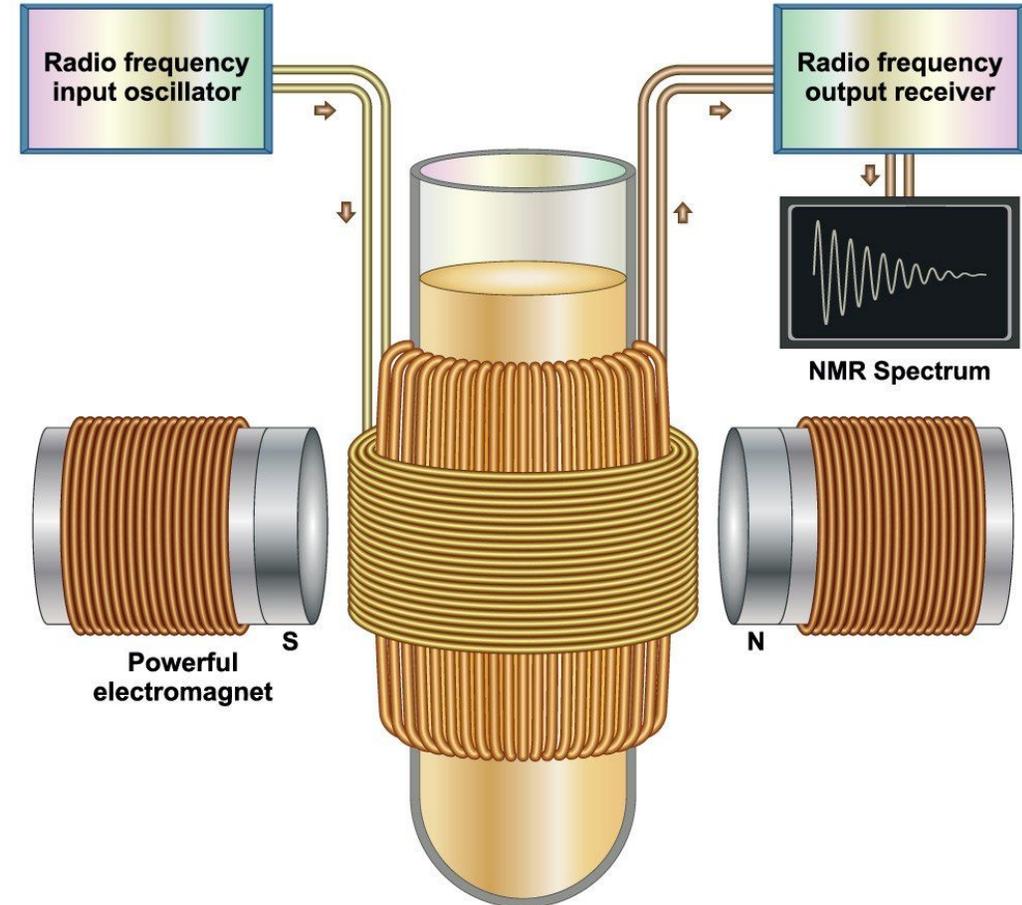
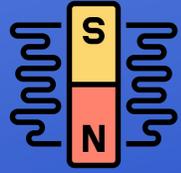
1 tâche

“Polariseur-Analyseur”

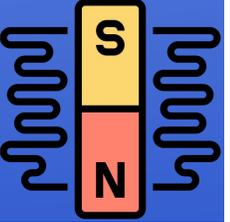


2 tâches

Conclusion



Plan du Cours



I. De la quantification spatiale...

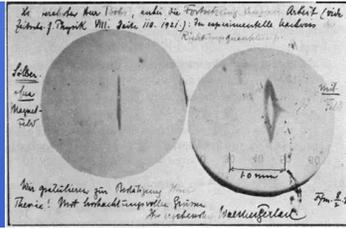
1. Rappels sur les dipôles magnétiques.
2. Dynamique dans un champ uniforme
3. Dynamique dans un champ non-uniforme.

II. ... à la découverte du spin

1. L'espace des états de spin.
2. Illustration des postulats de la mécanique quantique : préparation et mesure de spin.

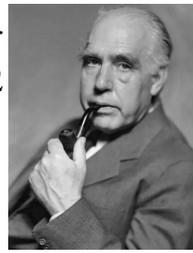
Conclusion :

Réactions



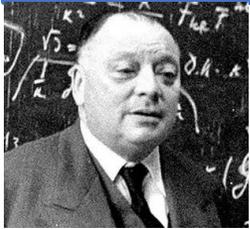
Niels Bohr
1885-1962

1922



“Je serai très reconnaissant, si Stern et vous me fassiez savoir en quelques lignes si vous interprétez vos résultats expérimentaux comme le fait que les atomes sont orientés seulement de façon parallèle ou opposé au champ magnétique, mais pas normalement, que quelqu'un puisse ensuite vous fournir des confirmations théoriques par la suite.”

“Cela devrait convaincre même le sceptique Stern.”



1945



Wolfgang Pauli
1900-1958

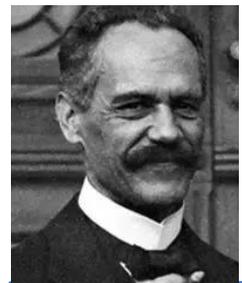
“Le succès le plus intéressant à ce stade est l'expérience de Stern et Gerlach. L'alignement des atomes sans collisions via des échanges radiatifs n'est pas compréhensible par les connaissances actuelles ; cela devrait prendre plus de 100 ans pour obtenir un alignement d'atomes. J'ai fait un petit calcul à ce propos avec Ehrenfest. Rubens considère que le résultat est absolument certain.”

James Franck
1882-1964

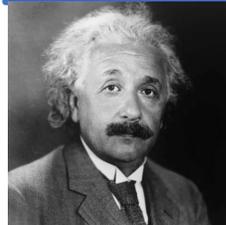
1925



“Le plus important, c'est de savoir si cela prouve l'existence de la quantification spatiale. Ajoutez quelques explications à ce puzzle, que l'on sache ce qu'il passe.”



Arnold Sommerfeld
1868-1951



1921



Albert Einstein
1879-1955

Isidor Isaac Rabi
1898-1988

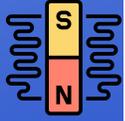
1944



“En temps qu'étudiant en maîtrise en 1923, j'espérais naïvement et audacieusement pouvoir trouver un moyen de relier les mécanismes atomiques à une sorte de système mécanique. Cet espoir mourut lorsque j'appris pour l'expérience de Stern et Gerlach. Les résultats étaient stupéfiants, quand bien même les expérimentateurs étaient rebutés par la théorie quantique. Cela me convint une fois pour toutes que la mécanique classique était disqualifiée et que devons affronter le fait que les phénomènes quantiques requerraient une toute nouvelle orientation.”

“Grâce à leur intelligent dispositif expérimental, Stern et Gerlach n'ont pas seulement démontré *ad oculos* la quantification spatiale des atomes dans un champ magnétique, ils ont aussi prouvé l'origine quantique de l'électricité et son lien avec la structure atomique.”

Exemple



Dipôle magnétique	Aimantation	Champ magnétique en surface
Aimant en fer 	$1 - 10 A/m^2$	Quelques gauss
Aimant en Néodyme-fer 	$10^4 A/m^2$	1,25 T
Bobines supraconductrices 	/	10 T
La Terre 	$8 \times 10^{22} A/m^2$	En France, en moyenne : 0.2 G
Naine jaune 	$10^{31} A/m^2$	$10^4 T$
Etoile à neutrons 	$10^{20} A/m^2$	$10^8 T$
Espace interstellaire 	/	$10^{-10} - 10^{-8} T$