TD2 - Diffraction de particules

I. Expérience des fentes d'Young – Interférences lumineuses

Les fentes de Young sont l'objet d'une expérience de physique réalisée en 1801 par Thomas Young qui consiste à diriger de la lumière sur deux petites fentes. La lumière est ensuite récupérée sur un écran. On y observe un motif de diffraction, c'est-à-dire que certains endroits sur l'écran sont totalement sombres, et d'autres sont très lumineux, du fait de l'interférence des rayons diffusés par les deux fentes.

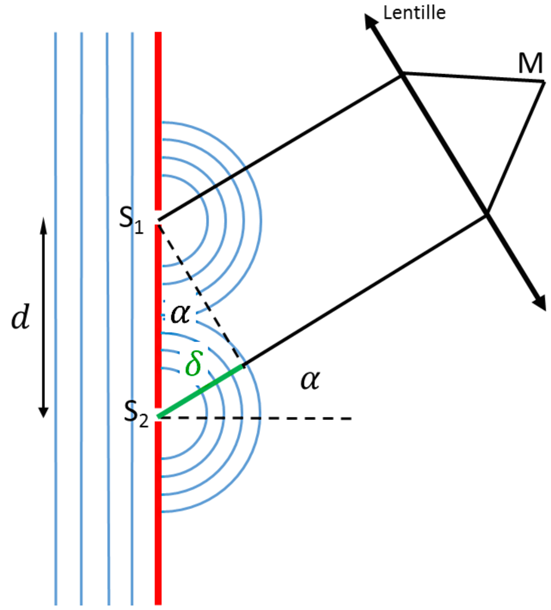

***Figure 1** : Expérience des fentes d'Young avec observation à l'infini en utilisant une lentille convergente.*

On décrit ici une version simplifiée de l'expérience réalisée en 1801 par Thomas Young qui consiste à diriger de la lumière sur deux petites fentes supposées infiniment fines. En plus de la diffraction, cette expérience met en évidence le phénomène d'interférence.
On considère deux fentes S_1 et S_2. La lumière diffracte dans le plan, et de manière uniforme dans toutes les directions (intensité constante quelque soit l'angle α). Les rayons diffractés sont ensuite recueillis sur une lentille convergente et on place un détecteur au foyer (M) de la lentille où les rayons s'additionnent (interfèrent). On mesure l'intensité en fonction de l'angle α (figure 1)

a) L'onde totale (par exemple une des composantes du champ électrique) au point M s'écrit comme la somme des deux composantes issues de S_1 et S_2 : $E = E_0 \sin(\omega t) + E_0 \sin(\omega t - \Delta\varphi)$ en notation réelle. E_0 est l'amplitude de chaque composante et $\Delta\varphi$ est le déphasage entre les deux ondes (on verra que $\Delta\varphi$ est une fonction simple de α). Réécrire cette expression sous la forme d'un produit de fonctions sinus ou cosinus et en déduire que l'amplitude de l'onde résultante varie en fonction de $\Delta\varphi$. A quelle condition sur $\Delta\varphi$ obtient-on une interférence constructive entre les ondes ? Destructive ?

b) $\Delta\varphi$ caractérise le fait qu'une onde a un certain retard par rapport à l'autre. En effet, pour arriver au point M, le chemin à parcourir n'est pas de la même longueur pour la lumière qui provient d'une source ou de l'autre. On appelle différence de marche optique la différence δ entre les chemins parcourus. Calculer δ en fonction de α et d, la distance entre les deux fentes. En déduire $\Delta\varphi$ en fonction de α, d, et de la longueur d'onde λ.

c) Calculer l'intensité I de l'onde (carré de l'amplitude) en fonction de α, d, et λ. En déduire la variation d'angle $\Delta\alpha$ entre deux franges brillantes successives. Tracer I en fonction de α.

II. Diffraction de molécules et fentes d'Young

Nous allons maintenant tenter une expérience du même type, mais cette fois en envoyant des molécules sur les fentes d'Young (le dispositif expérimental n'est évidemment pas le même qu'avec la lumière). Vous pouvez observer le résultat sur la vidéo 'SingleMoleculeMovie'. (https://www.youtube.com/watch?v=wDx8tu-iX8U)

a) Qu'observe-t-on

- au début (close-up de 25s à 29 s - vous pouvez ralentir le film!)
- à la fin de l'expérience (44 à 53 s)
- En quoi cette expérience démontre bien la dualité onde-corpuscule ?

b) Dans l'expérience des fentes d'Young avec de la lumière, suivant l'interprétation ondulatoire, que se passe-t-il si l'on place un détecteur de lumière à la sortie d'une des fentes ? Que voit-on sur le détecteur ? Mêmes questions quand on réalise l'expérience avec des molécules, en envoyant ces molécules une par une? Ceci met en évidence le problème de la mesure en mécanique quantique, comme nous allons le voir plus en détail dans la suite du cours.

III. Diffraction d'électrons : expérience de Davisson et Germer

Nous venons de voir que l'expérience des fentes d'Young, initialement réalisée avec de la lumière, pouvait l'être également avec des molécules. De même, à l'échelle atomique, si l'on irradie un atome par un rayonnement, il y aura diffraction du rayonnement incident par l'atome si la longueur d'onde du faisceau incident λ est du même ordre de grandeur que la taille de l'atome, c'est-à-dire dans la gamme 0.1-1Å. Si l'on irradie non plus un atome mais un solide cristallin, c'est-à-dire un solide constitué d'atomes arrangés périodiquement dans l'espace, les ondes diffractées par les atomes vont interférer et l'on obtiendra ainsi une figure de diffraction présentant des maxima très prononcés pour des valeurs particulières du rapport λ/d où d est la distance entre atomes.

La découverte des rayons X qui ont des longueurs d'onde typiques de 0.1-1Å par Röntgen en 1897 permit l'essor des expériences de diffraction X par des solides cristallins et la détermination des principales structures cristallines existantes.

En 1927, Davisson et Germer ont montré que le même type de diagramme de diffraction pouvait être obtenu en utilisant non pas des rayons X mais un faisceau d'électrons. Ces résultats ne pouvaient pas être interprétés par la Mécanique Classique qui considère l'électron comme une particule chargée mais seulement en associant une onde à l'électron, conformément à l'hypothèse de De Broglie. Partant de cette hypothèse, l'expérience de Davisson et Germer permet de calculer la longueur d'onde associée aux électrons et la valeur trouvée est en parfait accord avec celle de De Broglie. C'est ce que nous allons montrer ici.

III.1) Diffraction de rayons X par un cristal de nickel

On considère un faisceau de rayons X parallèles, de longueur d'onde λ= 1.54Å, incident sur la surface d'un cristal de nickel, en faisant un angle θ avec la surface, taillée parallèlement à une famille de plans atomiques (figure 2).

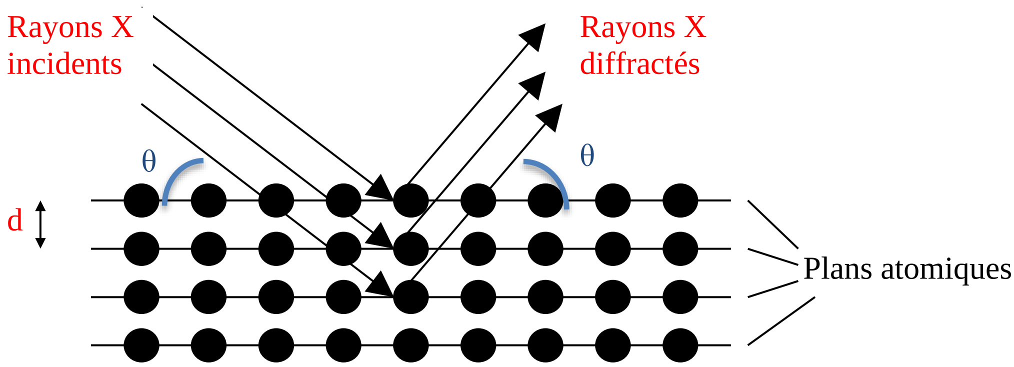

Figure 2 *: Diffraction de rayons X par un cristal.*

a) Calculer la différence de marche δ entre 2 rayons diffractés par 2 plans successifs en fonction de *d*.
b) Quelle est la condition d'observation de maxima d'intensité diffractée en fonction de *d*, λ et θ ? Cette relation est connue sous le nom de Loi de Bragg.
c) Sachant que l'on obtient un maximum d'intensité d'ordre 1 pour θ_1= 58°, en déduire la distance entre les plans atomiques du cristal.

III.2) Diffraction d'électrons par un cristal de nickel

Davisson et Germer ont réalisé la même expérience en utilisant cette fois un faisceau d'électrons d'énergie cinétique E_c = 48 eV incident sur un cristal de nickel. Ils ont obtenu un maximum d'électrons diffractés pour un angle θ = 72°.

a) En utilisant la relation du 1.b), calculer la longueur d'onde associée aux électrons.
b) Comparer la valeur du 2.a) avec celle donnée par la formule de De Broglie.

Eléments de réponse

1a) δ = 2d sinθ
1b) 2dsinθ = nλ
1c) d = 0.91Å

2a) λ = 1.73Å
2b) λ = 1.77Å