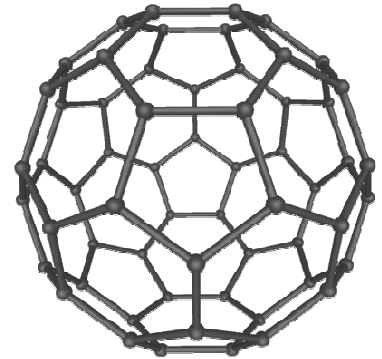


Expérience d'interférences avec des molécules de fullerène C60

Présentation.

Cette expérience a été conduite avec succès dans les années 2000. Elle utilise des molécules de fullerène, composé du carbone constitué d'un édifice d'atomes de carbones en C60.



Molécule de fullerène : C60

Cette molécule est ainsi nommée en hommage à l'architecte James Fuller, concepteur de structures reposant sur cette géométrie.

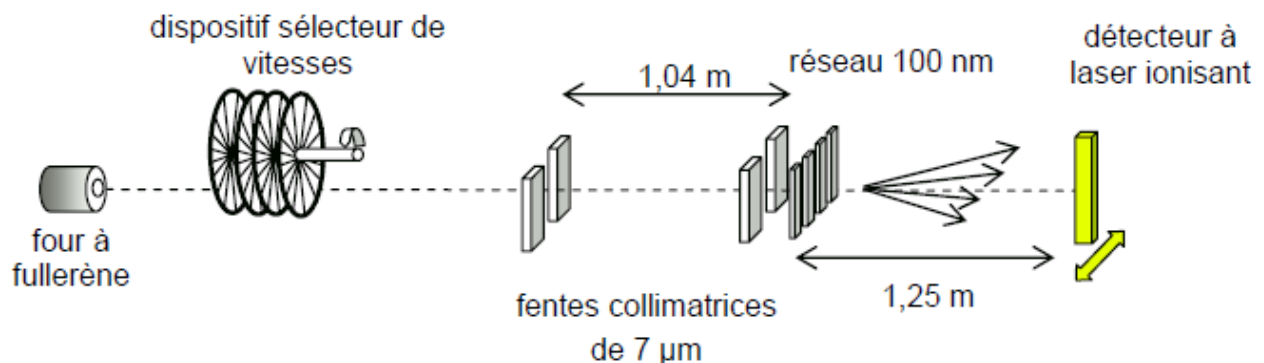
La première partie est constituée d'un résumé en français tiré de l'article original, assorti de quelques questions.

Une seconde partie propose une étude partielle du texte original, en anglais (un lexique est fourni pour quelques termes techniques).

Partie 1 :

Le dispositif expérimental est décrit sur la figure ci-dessous. Il est constitué d'une source qui contient un gaz constitué de molécules de fullerène C60 à une température de l'ordre de 900 K, ce qui correspond à une vitesse moyenne v_m de 200 m/s avec une largeur relative de 60% $\Delta v_m/v_m = 60\%$.

La longueur d'onde de de Broglie associée aux molécules de fullerène, de masse $m = 1,2 \cdot 10^{-24}$ a pour valeur $\lambda = 2,8$ pm. Nous pouvons souligner qu'elle est très petite à l'échelle de la taille de la molécule qui est de l'ordre de 1 nm = 1000 pm.



Interférences avec du C60 (d'après American Journal of Physics, avril 2003)

L'élément principal du montage est constitué par un réseau de pas $d = 100$ nm, la largeur d'une fente est de l'ordre de 55 nm. L'observation est réalisée dans un plan situé à une distance $L = 1,25$ m, le détecteur utilise un laser à argon qui ionise les molécules. La résolution spatiale du détecteur est de l'ordre de 8 μm ce qui est suffisant pour observer la figure d'interférence.

Notons que les molécules sont identifiées par des impacts individuels et que la figure d'interférence se construit, pas à pas, au fur et à mesure de l'accumulation des données.

Les résultats

La figure ci-dessous montre l'allure de la figure d'interférence observée. Elle fixe également les échelles de distances.

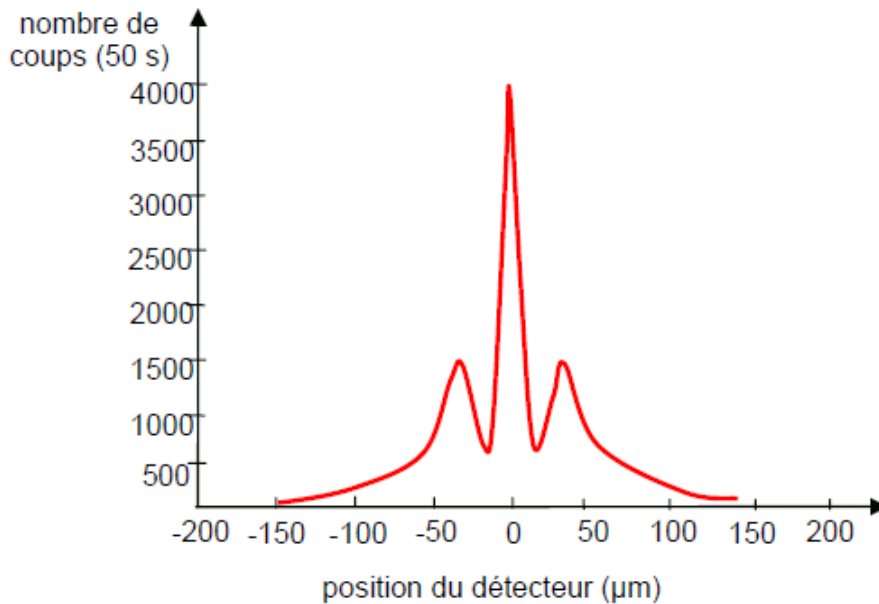


Figure d'interférence avec du C60 pour une vitesse moyenne des molécules de fullerène de 200 m/s (d'après American Journal of Physics, avril 2003).

Questions partie 1 :

Q1 : D'autres expériences mettant en jeu des ondes de matière ont été présentées en cours (expérience de Tonomura sur l'interférence d'électrons, expérience de Shimizu concernant des interférences par traversée d'une double fente par des atomes de Néons...). Quel est leur point commun ? Sur quel concept fondamental reposent-elles ?

Q2 : Vérifier numériquement la valeur proposée pour la longueur d'onde associée aux molécules de fullerène.

Q3 : La diffraction d'une onde à travers une fente d'un faisceau parallèle incident (onde plane) amène une ouverture angulaire θ délimitant le pic principal d'intensité répondant à l'expression : $\sin(\theta) = \lambda/d$ où d est la largeur de la fente. Vues les dimensions fournies sur le schéma expérimental, quel est la largeur du faisceau à l'entrée de la seconde fente collimatrice ? Quel est le rôle du système de deux fentes collimatrices ? Quel est le nombre de fentes utiles du réseau ?

Q4 : On rappelle la formule de Bragg, dite « formule des réseaux » :

$$p \frac{\lambda}{a} = \sin\theta - \sin\theta_0$$

où p est l'ordre d'interférence envisagé, λ la longueur d'onde, a le pas du réseau (intervalle entre les fentes successives, disposées périodiquement). θ est la direction d'émergence du maximum d'intensité, et θ_0 est la direction incidente de l'onde. Pour une incidence normale $\theta_0 = 0$.

Déterminer la distance attendue entre le pic principal et les pics du premier ordre, au niveau du récepteur dans la configuration de l'expérience. Comparer à la figure d'interférence fournie.

Q5 : Le schéma d'expérience proposé comporte un sélecteur de vitesse, non envisagé dans l'article original. Quel est l'effet de la dispersion des vitesses des molécules sur la figure d'interférences obtenue ? Quel serait l'intérêt de sélectionner les vitesses des molécules ?

Partie 2 : L'article source est proposé en annexe. La lecture des paragraphes situés entre les étoiles (*), abordant des notions assez délicates, n'est pas nécessaire pour le traitement des questions suivantes.

Lexique :

Beam : faisceau ; **Slit** : fente ; **Grating** : réseau

Waist : phénomène d'étalement spatial d'un faisceau Laser. **Cluster** : groupe, amas

Piezo : pour effet piézo-électrique. Certaines substances vont se déformer quand elles sont soumises à une tension électrique, et inversement leur déformation va faire naître une différence de potentiel entre les faces de l'échantillon.

Scattering : diffusion. La diffusion est le phénomène par lequel une onde, comme la lumière ou le son, ou un faisceau de particules, est déviée dans diverses directions par une interaction avec d'autres objets. La diffusion peut être isotrope, c'est-à-dire répartie uniformément dans toutes les directions, ou anisotrope.

Questions partie 2 :

Les questions sont ordonnées selon le plan de l'article.

Q1 : Décrire le processus employé pour la détection des molécules. Quelle est la résolution offerte par le dispositif ? Pourquoi ce procédé a-t-il été retenu ?

Q2 : Des difficultés d'alignement du dispositif sont évoquées dans le texte. Proposer, à partir d'un calcul simple, une valeur approximative de la déviation induite par la pesanteur pour les atomes lors de la traversée du système. On donne $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$.

Q3 : L'enregistrement expérimental est confronté à une figure d'interférence calculée théoriquement. Relever les paramètres qui sont pris en compte dans ce calcul.

Q4 : La largeur nominale des fentes du réseau est de $55 \mu\text{m}$, mais le comportement observé est plus en adéquation avec une largeur de $38 \mu\text{m}$. Quelle est l'explication proposée ?

Q5 : Quels sont les principaux arguments justifiant l'intérêt de cette expérience ?

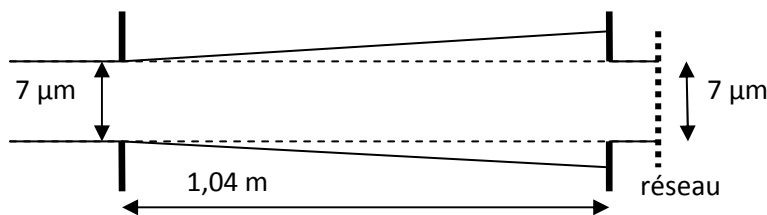
Q6 : L'article se conclut sur des perspectives d'expériences intéressantes des objets encore plus complexes. Lesquels ? Commenter.

Corrigé :**Partie 1 :**

Q1 : Ces expériences sur les ondes de matière ont ceci de commun qu'elles mettent en jeu des expériences dont les résultats s'interprètent théoriquement par un modèle ondulatoire (mettant en jeu des phénomènes de diffraction et d'interférence) tout en impliquant des particules de matière, dotées d'une masse non nulle contrairement aux photons (électrons, atomes, molécules...). L'interprétation repose sur le concept de dualité onde-corpuscule introduit par de Broglie : à une particule de quantité de mouvement p (où $p = mv$ pour une particule massive non relativiste), est associée une onde de longueur d'onde $\lambda = h/p$ où h est la constante de Planck ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s).

Q2 : La longueur d'onde de de Broglie est donnée par la relation $\lambda = h/(m \cdot v_m)$. h est la constante de Planck : $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s⁻¹. Avec une masse $m = 1,2 \cdot 10^{-24}$ kg et une vitesse moyenne $v_m = 200$ m.s⁻¹ on trouve en effet $\lambda = 2,8 \cdot 10^{-12}$ m.

Q3 : L'angle principal de diffraction est ici $\theta \approx \sin(\theta) = \lambda/d$ avec $\lambda = 2,8$ pm et $d = 7,0$ μ m (ici $d \gg \lambda$, dans un rapport $d/\lambda \approx 2 \cdot 10^4$) soit $\theta = 4,0 \cdot 10^{-7}$ rad. La distance entre les deux fentes collimatrices étant de $L = 1,04$ m, la largeur du faisceau diffracté au niveau de la seconde fente collimatrice est donc d'environ $d + 2\lambda L/d = 7 \mu\text{m} + 0,8 \mu\text{m}$. La diffraction ne joue pas un grand rôle à ce niveau.



Le réseau apparaît disposé juste en sortie du dispositif collimateur. Le pas est la distance entre deux fentes consécutives et traduit la périodicité de la structure géométrique du réseau. La fente de sortie étant d'une largeur de $7 \mu\text{m}$, on peut considérer que le réseau, de pas $a = 100$ nm aura un nombre de fentes utile d'environ $7 \cdot 10^{-6} / 100 \cdot 10^{-9} = 70$.

Le rôle du système des deux fentes collimatrice est d'imposer un alignement, et de sélectionner ainsi les molécules arrivant avec une vitesse incidente pratiquement orthogonale au réseau.

L'écart angulaire maximal à cette direction est de l'ordre de $\alpha = 7 \mu\text{m} / 1,04 \text{ m} = 7 \cdot 10^{-6}$ rad. Le réseau peut donc être considéré comme recevant une onde (de matière) en incidence normale.

Q4 : Pour l'évaluation de la distance entre les deux pics successifs, il faut utiliser la condition d'interférences constructives des réseaux, avec $\theta_0 = 0$ (incidence normale). Pour $p = 0$, $\theta = 0$ correspond au maximum centrale. Pour $p = 1$, on aura $\sin(\theta) = \lambda/a$, avec $\sin(\theta) \approx \theta \approx \tan(\theta)$ car le rapport λ/a est très faible. On en déduit une distance sur le capteur : $x = L \cdot \lambda/a$ où $L = 1,25$ m, ce qui donne une distance entre les pics d'intensité de $x \approx 35 \mu\text{m}$.

Ce qui est conforme aux données de la figure d'interférence.

Q5 : Le nombre de pics que l'on peut visualiser est limité en raison de la grande dispersion des vitesses. Les molécules traversant le dispositif avec des vitesses différentes, statistiquement distribuées autour d'une valeur moyenne d'environ 220 m.s⁻¹, cela revient à mettre en jeu des interférences superposant les effets d'ondes de diverses longueurs d'onde, ce qui induit un

élargissement des pics d'intensité. Il est possible d'améliorer cet aspect en sélectionnant un domaine plus étroit de vitesses.

Partie 2 :

Q1 : La détection est obtenue par l'interaction des atomes de fullerène avec un laser à argon, dont le faisceau est orienté parallèlement aux fentes du réseau, ainsi qu'aux fentes du dispositif collimateur. Par absorption de la lumière laser, les atomes de fullerène C60 vont être ionisés en émettant des électrons par effet thermoélectronique. Ces ions sont accélérés et focalisés par un système de lentilles électrostatiques. Leur collision sur une électrode induit l'émission d'électrons. Ce signal est détecté et amplifié par un détecteur (nommé Channeltron). Le procédé permet une résolution de l'ordre du micromètre pour l'enregistrement de la figure d'interférence. Il permet d'éviter la perturbation de l'enregistrement par les atomes des gaz résiduels présents dans la chambre à vide du système.

Q2 : Le problème se ramène au calcul de la déviation subie sur la trajectoire d'une particule matérielle de masse m propulsée dans le champ de pesanteur uniforme avec une vitesse initiale horizontale. La mise en équation s'obtient par la deuxième loi de Newton : $m\vec{a} = m\vec{g}$ qui donne en projection sur les axes (Ox) (horizontal) et (Oz) (vertical, dirigé vers le bas) : $m\ddot{x} = 0$ et $m\ddot{z} = mg$

On simplifie les équations par la masse m et l'on intègre avec pour conditions initiales :

$$\vec{v}(0) = v_0 \vec{e}_x$$

où $v_0 = 220 \text{ m.s}^{-1}$ (vitesse la plus probable en sortie du four)

et une position initiale de coordonnées $x(0) = 0$ et $z(0) = 0$.

On obtient par une première intégration dans le temps :

$$\dot{x}(t) = v_0 \quad \text{et} \quad \dot{z}(t) = g \cdot t$$

puis par une seconde intégration temporelle :

$$x(t) = v_0 \cdot t \quad \text{et} \quad z(t) = g \cdot \frac{t^2}{2}$$

Les atomes de fullerène doivent parcourir un trajet total de longueur approximative $L_{\text{tot}} = 1,04 + 1,25 = 2,29 \text{ m}$. La durée du trajet avant impact sur le détecteur est donc $t_i = L/v_0$ et leur position verticale est alors $z(t_i) = g \cdot (L/v_0)^2 / 2$. Ce qui amène : $5,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ pour $v_0 = 220 \text{ m.s}^{-1}$ et $6,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ pour $v_0 = 200 \text{ m.s}^{-1}$. En accord avec la valeur de 0,7 mm fournie dans le texte.

Q3 : Le calcul théorique prend en compte le pas du réseau (de valeur 100 nm), la largeur du faisceau incident, mais aussi la largeur des fentes du réseau, ainsi que la distribution statistique des vitesses des molécules (qui équivaut à une distribution statistique des longueurs d'onde de de Broglie). Il prend en compte aussi la résolution du détecteur.

Q4 : Les auteurs de l'article explique cet écart par l'interaction des atomes de fullerène avec le réseau (avec les bords des fentes) lors de sa traversée, par interactions de Van der Waals. Les fentes du réseau apparaissent ainsi moins larges.

Q5 : L'expérience révèle que le faisceau n'est pas constitué uniquement de molécules de fullerène C60, mais qu'il y a présence d'isotopes du carbone dans les structures avec une probabilité forte.

L'observation de ces interférences montre que l'édifice complexe qu'est la molécule de fullerène se comporte bien comme une seule particule dans sa propagation à travers le système.

La cohérence nécessaire à la formation de ces figures d'interférence montre, compte tenu de la distribution statistique de leurs états, qu'il s'agit bien d'une interférence de la particule-onde avec elle-même et non d'une interaction entre les différentes molécules de fullerène.

Q6 : Les auteurs envisagent d'appliquer la même démarche pour des macromolécules encore plus grandes (protéines par exemple ?), des édifices complexes (amas de molécules), et pourquoi pas même de petits virus ... Cela reste très hypothétique, puisque que l'on ne donne pas de solution pour les accélérer et en former un faisceau (sans détruire leur structure...), ni pour les détecter.