

FICHE PEDAGOGIQUE

La lumière 2

« La vitesse de la lumière »

La vitesse de la lumière : mesure grâce à un four à micro-onde

Nous savons que la lumière émise par le soleil se déplace à une vitesse d'environ 300 000 km/s, à une fréquence d'environ 600 000 GHz.

Grâce à une expérience simple, nous pouvons mesurer la vitesse de la lumière avec un four à micro-onde.

Objectifs :

- Mesurer simplement la vitesse de la lumière

Introduction :

Au cœur d'un four à micro-ondes, on peut observer qu'en utilisant le plateau tournant, la nourriture est chauffée de manière uniforme. Si on retire le plateau et tous les moyens de dispersion des micro-ondes, la nourriture ne va pas être chauffée uniformément. Justement, sur n'importe quel aliment (à condition qu'il soit composé d'eau !), il va y avoir présence de zones plus chaudes qu'on nommera points chauds. Si on observe ces points chauds, on peut même remarquer qu'à priori ils seraient séparés d'une distance régulière.

Nous savons que les micro-ondes deviennent des ondes stationnaires dans le FMO, celles-ci même qui chauffent les aliments. Justement, les ayant déjà étudiées nous avons remarqué que les distances entre chaque ventre et chaque nœud d'une onde stationnaire sont régulières. D'après ces deux faits, nous pouvons alors nous demander si la distance entre chaque point chaud formé est en relation avec la distance entre chaque ventre ou nœud de ces ondes stationnaires. Cela signifie que les molécules d'eau s'agitent très fortement aux ventres de l'onde stationnaire. Les points chauds, ainsi formés par l'agitation de ces molécules au maximum du champ électrique, nous permettent de montrer le passage des différentes ondes stationnaires. On devrait alors trouver sur les aliments (à condition qu'il n'y ait aucun moyen de dispersion), des lignes sur lesquelles des points chauds se seraient formés, espacés de manière régulière.

Protocole expérimental pour expliquer le phénomène

L'expérience est réalisée dans le but de mesurer la distance entre chaque point chaud, soit la distance entre chaque ventre de l'onde stationnaire. Il convient alors de convertir la longueur d'onde en vitesse de propagation. Cette expérience peut être réalisée à l'aide de tous les aliments (à condition qu'ils contiennent des molécules d'eau). Nous utiliserons ici du fromage ou du chocolat, selon ce qui nous reste dans l'assiette !

Déroulement :

- Retirer le plateau tournant (les roulements sous l'assiette en verre).
- Déposer ensuite le chocolat ou le fromage sur une assiette, fermer le four et le faire fonctionner environ 20 secondes à puissance normale.
- Sortir l'assiette. Il doit y avoir des zones fondues et d'autres non fondues. Si rien n'est fondu, recommencer l'expérience en laissant l'assiette deux fois plus longtemps.
- Mesurer l'écart entre deux zones fondues au préalable.

On remarque que le chocolat est fondu à certains endroits précis. Pour comprendre pourquoi, il faut tout d'abord comprendre comment le four à micro-ondes fonctionne.

Explication :

Le four à micro-ondes et les molécules d'eau

Pour réchauffer ou cuire des aliments, le four à micro-ondes exploite une propriété particulière des molécules d'eau contenues dans les aliments. Ces molécules sont comme de minuscules aimants qui ont un pôle positif et un pôle négatif. En présence d'un champ électromagnétique oscillant, elles s'orientent selon les lignes de champs, comme si on bougeait un gros aimant devant elles. Dire qu'il y a un champ électromagnétique quelque part, cela veut simplement dire qu'il y a des ondes électromagnétiques (on en parlera plus tard). Rien que dans ta chambre, il y a plusieurs champs : un champ de température de l'air par exemple, un champ électromagnétique créé par les appareils électriques.

Le four à micro-ondes crée un champ électromagnétique qui tourne et change de direction 2,45 milliards de fois en une seconde. Les molécules d'eau essaient de faire pareil mais n'y arrivent pas très bien, elles s'agitent et s'énervent, dégagent de la chaleur et réchauffent les aliments. Les autres molécules présentes n'ont pas de pôles négatifs ou positifs et sont pratiquement insensibles aux oscillations du champ électromagnétique.

Voyons maintenant ce qu'est ce champ électromagnétique.

Le champ et les ondes électromagnétiques

Comment se fait-il que le chocolat soit liquide en certaines zones et pas d'autres? Une onde est la propagation d'une perturbation qui affecte sur son passage les propriétés du milieu. Cela peut être une variation de pression (onde acoustique), de hauteur (vague dans la mer) ou même un ralentissement sur l'autoroute. Les ondes émises dans le four sont des ondes électromagnétiques, c'est à dire qu'elles affectent les champs électriques et magnétiques. Elles ont cette forme:



Représentation d'une onde électromagnétique.

Elles provoquent des variations continues du champ en tout point du four avec une fréquence de 2,45 Giga Hertz, c'est-à-dire que le champ change totalement de direction 2 milliards 450 millions de fois par seconde. Cela signifie que, si en un point, à un instant, le champ est maximal et orienté vers le haut (comme la flèche rouge à gauche sur le schéma), alors il sera de nouveau maximal et orienté vers le haut 0,4 milliardièmes de secondes plus tard (1 divisé par 2 450 000 000). Sur l'illustration, on voit également la longueur d'onde (notée λ , prononcée Lambda) qui correspond à la distance entre deux états identiques de l'onde (2 maximums par exemple). Comme ces ondes sont émises dans une enceinte fermée, elles sont réfléchies par les parois et se superposent, créant des ondes dites « stationnaires ». Au lieu de varier continuellement au cours du temps, le champ prend des valeurs nulles et maximales en certains points fixes. Pour reprendre l'exemple des vagues, c'est comme si elles se figeaient et restaient tout le temps au même endroit. Cette petite animation permet de visualiser le phénomène, on peut y voir deux ondes se propageant en sens contraire. L'onde résultante (la superposition des ondes rouge et bleue, est une onde stationnaire.

Onde stationnaire :

Les points où le champ est nul sont appelés « nœuds » et les points où le champ est maximal, « ventres ». À proximité des nœuds, le champ est très faible voire nul. Les molécules d'eau ne sont donc pas très agitées et la température peu élevée. Ceci a pour effet de créer des zones plus ou moins fondues dans le chocolat. Pour remédier à ce problème, les fabricants équipent leurs fours d'un plateau tournant et de dispositifs de diffraction (les petits trous et les renforcements à l'intérieur).

Calcul de la vitesse de la lumière

L'onde stationnaire dans le micro-onde

En mesurant la distance qui sépare deux zones fondues, on a mesuré la distance entre 2 ventres, c'est à dire la moitié de la longueur d'onde de l'onde stationnaire. Normalement, on devrait mesurer une longueur d'onde d'environ $2 \times 6 = 12$ cm (0,12 m). On utilise cette petite formule pour estimer la vitesse de la lumière: $\lambda = c / f$

C'est la vitesse de la lumière, λ (Lambda) la longueur d'onde et f , la fréquence. La vitesse de la lumière est donc égale à λ multiplié par f : ce qui est une assez bonne estimation de la vitesse de la lumière (299 792 458 m.s-1), compte tenu de l'imprécision du dispositif !

m) Mesure par modulation de l'intensité d'un faisceau laser

Ce montage expérimental permet une mesure de la vitesse de la lumière nécessitant qu'un faible encombrement. Il utilise le principe de la modulation de l'intensité d'un faisceau laser et la capacité des fibres optiques à transporter de la lumière. Le schéma du montage est assez simple : une diode laser est modulée par un signal carré. Une lame séparatrice permet de diviser le faisceau laser en deux faisceaux : l'un va directement sur une photodiode qui restitue l'intensité de la lumière en courant électrique, l'autre passe par une fibre optique d'une grande longueur. À la sortie de la fibre, la lumière est récupérée sur une deuxième photodiode qui transforme le signal en un courant électrique correspondant. Les courants des deux photodiodes sont ainsi visualisés sur un oscilloscope. La mesure du décalage temporel entre les deux signaux permet donc de définir la vitesse de la lumière.

Cette expérience, disponible à l'Espace Sciences de la Matière à l'Université d'Aix-Marseille, peut être mise à la disposition de la SFP et de PSM sous forme d'atelier, moyennant quelques modifications et améliorations pour en simplifier le fonctionnement.

n) Mesure de la vitesse de la lumière – expérience de Foucault

Le marathon des mesures : l'historique.

La première mesure de la vitesse de la lumière a été faite par Olaüs Römer en 1676 grâce à l'analyse des données de Cassini sur les éclipses des satellites de Jupiter à l'Observatoire de Paris. Il obtint alors environ 215 000 km/s. Ce résultat astronomique fut confirmé en 1728 par Bradley qui utilisa l'influence de la vitesse de la Terre sur son orbite autour du Soleil. Il obtint alors environ 280 000 km/s. En 1849, Hippolyte Fizeau obtint environ 315 000 km/s en utilisant un système mécanique de miroirs et une roue dentée en rotation (la vitesse de la roue était ajustée pour permettre le passage du rayon lumineux à l'aller, puis au retour après une réflexion sur un miroir).

Ensuite, Foucault reprit le même genre d'expérience (la roue dentée fut remplacée par un miroir en rotation) et sa mesure la plus précise, en 1862, s'approcha de la valeur actuelle, soit environ 300 000 km/s.

Plus tard, Michelson montra aussi que la vitesse de la lumière, dans le vide, ne dépend plus de la longueur d'onde. Le fait que la lumière puisse se propager dans le vide a longtemps perturbé les physiciens. En effet, toutes les ondes connues avaient besoin d'un milieu matériel pour se propager. C'est ainsi qu'ils supposèrent l'existence d'un milieu spécial qui devait autoriser la propagation de la lumière : l'éther, dont les Grecs avaient déjà parlé dans leur cosmologie. C'est alors que Michelson et Morley tentèrent de mettre en évidence expérimentalement un mouvement terrestre par rapport à l'éther (le « vent d'éther » devrait changer relativement à la Terre, en 6 mois d'intervalle, à cause du mouvement de la Terre autour du Soleil). Mais les résultats de leurs expériences ne permirent jamais de détecter ce vent d'éther.

Peu après, Albert Einstein va s'inspirer de ces « expériences négatives » d'observation : c'est le postulat de la relativité restreinte (1905) qui débouchera sur la fameuse relation $E = mc^2$.

De nos jours, nombreuses expériences sont réalisables avec des moyens abordables, au laboratoire ou « à la maison ».

Reconstitution de l'expérience de Foucault

Le montage expérimental comprend:

- un banc d'optique de 1m ,
- un laser He-Ne de 0,5 mW à 632.8 nm.
- un miroir tournant asservi par un boîtier de commandes. La mesure de la vitesse angulaire est donnée à 0.1 %. La rotation du miroir est réversible et son taux est continuellement variable de 100 à 1 révolution par seconde. Ce miroir peut tourner au maximum à 1500 tours/secondes.
- un miroir fixe de 13.5 m de rayon de courbure,
- un microscope de grossissement 90X. Le déplacement des points lumineux peut être résolu à 0.005 mm.

Déroulement de l'expérience :

1. Une première observation est effectuée lorsque le miroir tournant (MT) est immobile. La lumière provenant du faisceau laser He-Ne est focalisée en un point S par la lentille L1. La lentille L2 est positionnée de telle sorte que l'image de S soit réfléchi par le miroir tournant vers le miroir fixe (MF). Le miroir fixe réfléchit alors l'image vers le miroir tournant, qui renvoie l'image vers les lentilles pour reformer le point image en S. La

lumière passe aussi par une lame séparatrice (LS) ce qui permet d'obtenir l'image de S, notée S', dans le microscope.

2. La seconde observation est faite lorsque le miroir tournant tourne. Puisque cela prend un temps fini à la lumière pour traverser la distance D, qui sépare le miroir fixe et le miroir tournant, le miroir tournant se trouve dans une position un peu différente lorsque la lumière revient sur celui-ci après avoir été réfléchi par le miroir fixe. Ceci provoque un déplacement de l'image S', qui peut être mesuré au microscope.
3. Le déplacement de S' entre sa première observation et sa seconde ($\Delta S = S_2 - S_1$) est proportionnel au temps qu'a mis la lumière pour parcourir la distance D et à la vitesse angulaire du miroir tournant. Avec un calcul immédiat, la vitesse de la lumière dans l'air peut être déduite:

Réalisation : Jean-Pierre ROZELOT, *président* et Dave LOLLMAN, *vice-président*