

 IDÉES DE PHYSIQUE

Vitesse de la lumière et four à micro-ondes

Contrairement à ce que d'aucuns affirment, la visualisation des ondes stationnaires dans un four à micro-ondes ne permet pas de mesurer facilement la vitesse de la lumière.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

De nombreux sites Internet francophones ou anglophones proposent de réaliser une expérience sympathique et éclairante avec un four à micro-ondes : visualiser la figure des ondes stationnaires formées dans le four par les ondes électromagnétiques et en mesurer la longueur d'onde, pour en déduire la valeur de la vitesse de la lumière. Cette proposition séduisante repose hélas sur des idées trop simplistes. Il est en effet bien difficile de dépasser le stade qualitatif, en raison de la nature tridimensionnelle des ondes stationnaires – même si, par chance, il arrive parfois que le résultat numérique obtenu ne s'écarte que de quelques pourcents de la valeur attendue...

L'expérience est rapide et facile à faire. Son résultat étonnera petits et grands qui auront passé ensemble un agréable moment en cuisine. Voici la procédure à suivre (en présence d'un adulte). D'abord, retirez le plateau tournant de votre four à micro-ondes et prévoyez quatre cales en carton sur lesquelles reposera une feuille de carton rectangulaire rigide légèrement plus petite que le four.

Disposez sur cette feuille une tablette de chocolat, ou des marshmallow, ou du blanc d'œuf... Les recettes que l'on peut trouver sont fort variées ; il suffit d'utiliser une substance contenant de l'eau et dont l'échauffement provoque une transformation visible. En ce qui nous concerne, afin de répéter l'expérience facilement et pour un coût modeste, nous avons opté pour de l'emmental râpé, que l'on saupoudre sur la feuille de papier ou de carton (voir la figure 1). Lorsque le fromage fond, la matière

grasse qui suinte imbibé le papier, ce qui facilite la visualisation.

Enfin, mettez en route le four et surveillez ce qui se passe par la fenêtre du four ou en ouvrant régulièrement la porte. Pour le gruyère râpé, un chauffage de 30 secondes semble convenir. Vous observerez alors que l'échauffement par les micro-ondes ne se produit qu'à certains endroits, et que la distance caractéristique entre deux endroits fondus (ou cuits) est de l'ordre de quelques centimètres (voir la figure 2).

Expérience simple, explication simpliste

Comment interpréter cette expérience ? Les parois métalliques intérieures sont, pour les micro-ondes produites par le four, comme des miroirs sur lesquels ces ondes

se réfléchissent. Quelle est la résultante de la superposition de toutes les ondes se propageant dans la cavité du four ? La situation est analogue à celle d'une corde vibrante, où l'onde qui se propage dans une direction interfère avec l'onde qui se propage dans la direction opposée.

Si la fréquence de ces ondes est appropriée, il y a résonance et la corde exhibe le profil caractéristique d'une onde stationnaire : en certains points, les « ventres », la corde vibre avec une amplitude maximale, tandis qu'à d'autres, les « nœuds », elle est immobile (voir la figure 2). Dans cette situation unidimensionnelle, la distance entre deux ventres ou deux nœuds successifs est égale à une demi-longueur d'onde, tandis que la longueur totale de la corde est égale à un nombre entier de demi-longueurs d'onde.

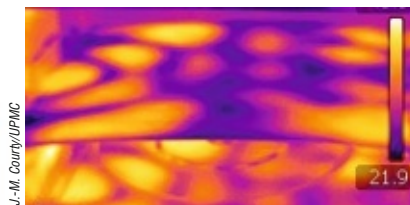
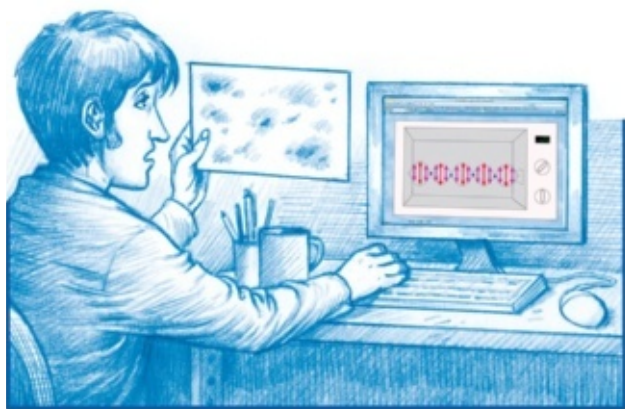
Il est alors tentant de faire brutalement l'analogie entre corde vibrante et four à micro-ondes, l'amplitude de la vibration de la corde correspondant à l'amplitude d'oscillation du champ électrique de l'onde électromagnétique. Là où elle est maximale (les ventres), le fromage, qui contient un peu d'eau, est davantage chauffé, ce qui fait fondre en premier la matière grasse présente à cet endroit. En mesurant la distance entre deux zones fondues et en multipliant par deux, on obtient la longueur d'onde.

Connaissant la fréquence des ondes créées par le four (2,45 gigahertz), on en déduit la vitesse de la lumière par une simple multiplication (la vitesse d'une onde est égale au produit de sa longueur d'onde par sa fréquence) : ainsi, lorsqu'on mesure une distance de six centimètres, on trouve une vitesse de 294 000 kilomètres par seconde,



1. CECI N'EST PAS UNE RECETTE... de cuisine, mais de physique : commencez par saupoudrer du gruyère râpé sur une feuille de carton rigide qui reposera dans le four à micro-ondes sur quatre cales de carton. Puis...

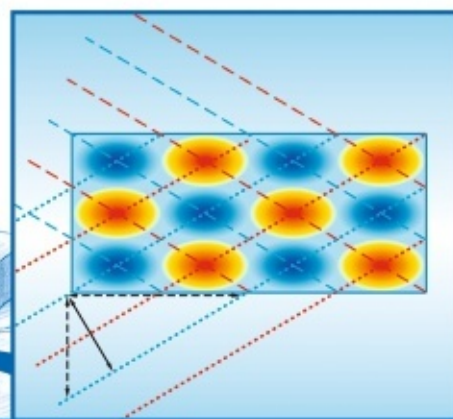
Dessins de Bruno Vacaro



2. LÀ OÙ LE FOUR A LE PLUS CHAUFFÉ, le gruyère a fondu et laissé des taches de gras. Mais la disposition des taches ne correspond pas du tout à ce qu'indiquent certains sites Internet, qui interprètent l'expérience sur la base d'une onde stationnaire établie selon une seule dimension du four. La répartition peu régulière des zones d'échauffement maximal dans un four est confirmée par le cliché pris avec une caméra à infrarouges (ci-dessus, avec la feuille surélevée dans le four).

résultat assez proche de la valeur correcte (environ 300 000 kilomètres par seconde).

C'est toutefois oublier que la cavité résonnante formée par l'intérieur d'un four à micro-ondes est un volume parallélépipédique à trois dimensions. Il est peu probable que l'onde électromagnétique y forme une onde stationnaire sur une seule des dimensions.



Des ondes 3D, pas 1D

Analysons ce qui se passe dans une section horizontale du four, de forme rectangulaire. Le champ électrique dans les fours à micro-ondes est vertical. Or, au niveau d'une surface conductrice, la composante du champ électrique parallèle à la surface s'annule. Il s'ensuit que le champ électrique est nul sur tout le périmètre du rectangle, lequel constitue donc une ligne nodale (chacun de ses points est un nœud).

Cela suggère que pour un mode résonnant donné, les lignes nodales forment un réseau régulier dans le rectangle et sans doute dans tout le volume. La difficulté est alors de savoir comment relier les trois dimensions du réseau (sa périodicité selon la longueur, la profondeur et la hauteur du four) à la longueur d'onde du rayonnement. Dans le cas d'un four parfaitement parallélépipédique, le calcul – confirmé par les observations des physiciens – montre que la relation entre la vitesse de la lumière, la fréquence de l'onde et la structure spatiale du mode fait intervenir la somme des carrés des inverses des périodes spatiales du réseau.

En pratique, dans un four de cuisine, la situation est plus complexe : les parois

3. EN LABORATOIRE, UN PHYSICIEN PEUT RÉALISER L'EXPÉRIENCE avec précision en utilisant une cavité métallique bien dimensionnée et parfaitement parallélépipédique. L'onde stationnaire à deux dimensions qui se forme dans une section horizontale de la cavité est la superposition de deux ondes stationnaires à une dimension, inclinées par rapport à l'axe du rectangle (une onde est représentée par des lignes pointillées, l'autre par des lignes à petits tirets ; le rouge indique l'amplitude maximale, le bleu foncé l'amplitude opposée). La longueur d'onde de la micro-onde est celle de ces ondes unidimensionnelles. Géométriquement, elle correspond à la hauteur d'un triangle rectangle dont les deux côtés (pointillés noirs) correspondent aux périodes spatiales mesurées sur le motif bidimensionnel.

du four présentent des irrégularités dues à la présence d'une lampe, d'ouvertures pour la ventilation, etc. Les objets présents dans le four pour réaliser l'expérience sont aussi des sources d'absorption ou de déviation des ondes.

En outre, plusieurs modes de résonance peuvent être excités, chacun avec sa propre structure spatiale : avec un four mesurant $29 \times 29 \times 19$ centimètres cubes, on en dénombre six, dont quatre présentent une, deux ou trois lignes nodales (en plus des parois) sur chacune des directions horizontales, lignes qui délimitent autant de zones de ventres. Si tous ces modes sont simultanément présents, dans des proportions

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTUY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

✓ BIBLIOGRAPHIE

J.-M. Courty et É. Kierlik,
À la chaleur des micro-ondes,
Pour la Science, n° 348,
octobre 2006 (reproduit
dans La physique buissonnière,
Belin-Pour la Science, 2010).

M. Vollmer, Physics
of the microwave oven,
Physics Education,
vol. 39, pp. 74-81, 2004.

 Retrouvez les articles de
J.-M. Courty et É. Kierlik sur
www.pourlascience.fr

variées, aucune structure spatiale simple ne sera visualisée par les parties fondues et il sera très délicat d'estimer la vitesse de la lumière.

Des coïncidences

Comme on peut le constater sur les photos présentées sur les divers sites Web, il arrive cependant que deux maxima soient séparés de la distance prévue par la théorie (fausse) unidimensionnelle. Dans ce cas, la mesure sera considérée comme une réussite et la personne qui l'a réalisée s'empressera de mettre la photo et le résultat sur son blog !

Cette configuration s'est produite plusieurs fois lors de nos expériences. En effet, dans certaines conditions, notamment en fonction de la quantité de gruyère,

nous avons observé deux bandes parallèles à la paroi du four selon la largeur, situation qui ressemble à celle d'une onde à une dimension.

En revanche, lorsque la valeur mesurée n'est pas celle attendue, l'échec est mis sur le compte d'un raté de l'expérience, d'une mauvaise manipulation ou d'une erreur de mesure. C'est ce qui s'est passé pour tous les collègues ayant tenté l'expérience avec qui nous avons discuté, et pour nous-mêmes avant que nous nous soyons rendu compte des insuffisances de l'analogie unidimensionnelle. Évidemment, dans de tels cas, on n'est pas tenté de poster un billet sur le Web pour dire que cela n'a pas marché... Pour en avoir le cœur net, nous vous invitons à poster les résultats (photos, chiffres...) de vos expérimentations sur notre blog. Tous en cuisine ! ■

Mardi 28 juin 2011 à 18h30
au Palais de la découverte
Avenue F.-D. Roosevelt • 75008 Paris

Raconte-moi un chercheur

Pour la Science, en partenariat avec le Palais de la découverte, vous convie, chaque mois, à passer une heure avec un scientifique.

Comment est-il devenu chercheur ? Quelles sont les différentes facettes de son métier ? En quoi consiste son travail au quotidien ?

En vous faisant partager leur expérience et en rendant leur métier plus concret, ces chercheurs ont une ambition : vous communiquer leur passion pour la science !

Invité

Jean-Marc Bonnet-Bidaud

Astrophysicien au CEA (Commissariat à l'énergie atomique), à Saclay, Jean-Marc Bonnet-Bidaud travaille au sein du Service d'astrophysique (SAP) de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu), dans l'Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS). Passionné d'astronomie chinoise, il a récemment analysé et daté le plus ancien atlas du ciel étoilé connu à ce jour, l'atlas chinois de Dunhuang.



un lieu
universcience
www.universcience.fr

POUR LA
SCIENCE
www.pourlascience.fr