

## 4.4a – La lumière à l'échelle du nanomètre.

Dans cette séquence, nous allons parler de nano-optique. La nano-optique qu'est-ce que c'est ?

Il s'agit de faire de l'optique, c'est-à-dire manipuler la lumière, à l'échelle du nanomètre.

Pourquoi vouloir manipuler la lumière à l'échelle du nanomètre, à quoi ça sert, la première chose à laquelle on pense lorsqu'on parle de lumière, c'est des images, voir, voir des choses extrêmement petites, la microscopie. Peut-on aller au-delà, au-delà des limites habituelles de la microscopie ?

On apprend à l'université, depuis un siècle, qu'il n'est pas possible, avec de la lumière, de faire des images d'objets plus petits que la longueur d'onde, c'est-à-dire quelques centaines de nanomètres, le micromètre typiquement.

Eh bien en fait on peut aller au-delà de cette limite, c'est ce que l'on va voir aujourd'hui. On peut aussi confiner la lumière sur des taches beaucoup plus petites que la longueur d'onde et on va voir à quoi cela peut servir.

La question de voir l'infiniment petit, il faut bien réfléchir à ce que ça veut dire. En soit voir quelque chose de petit n'est pas difficile. Je vous montre ici l'image d'un atome, un atome unique. N'importe quel objet est constitué d'atomes, et on ne peut pas imaginer quelque chose de plus petit qu'un atome unique. Il s'agit là d'un atome de rubidium, on l'éclaire à 780 nanomètres, qui est l'une des fréquences de transition de ces atomes, et vous voyez qu'on arrive à l'imager, il est tout seul et on le voit très bien.

Je ne dis pas que c'est simple, c'est des collègues de l'Institut d'Optique qui font ça, il faut l'attraper cet atome, et l'immobiliser, donc il est pris par une pince. C'est quoi une pince à atome ? C'est un faisceau laser focalisé et l'atome se trouve piégé au foyer du faisceau. C'est dans le vide, on l'éclaire et on le regarde, et on le voit très bien.

Ce qui est difficile, ce n'est donc pas de voir un seul atome. Voir un seul atome, le seul problème, c'est qu'il n'y a pas beaucoup de lumière. C'est uniquement un problème de sensibilité, mais en soit, ce n'est pas difficile.

Ce qui est difficile, c'est d'en voir deux et de s'apercevoir qu'il y en a deux, et pas un seul.

Là vous avez une image où il y a deux atomes, et ils sont séparés de 4 microns. Là vous voyez l'échelle, et vous voyez que l'image d'un atome, qui fait quelques angströms, en fait à l'échelle des 4 microns vous voyez que c'est à peu près 1 micron. Donc en fait le problème c'est que l'image d'un objet très petit est assez grosse, de l'ordre du micron, de l'ordre de la longueur d'onde utilisée pour l'imager.

Donc lorsqu'on veut voir des petits objets, il faut que l'image d'un point soit un point, et c'est ça qui est difficile, c'est une tache. C'est ce qu'on appelle la limite de diffraction, et c'est quelque chose de très bien connu depuis le 19ème siècle, on apprend tout ça à l'école en optique, et c'est même gravé dans le marbre ! Gravé dans le marbre depuis un siècle, vous avez ici une photo de la limite de diffraction de Abbe, qui est devant l'université de léna, en Allemagne.

Alors, comment faire pour casser cette limite qui a toujours été considérée comme une limite fondamentale ?

Cela a été proposé en 1972 par des collègues de l'UCL, l'University College à Londres, c'est Ash et Nicholls. L'idée est extrêmement simple :

Vous le voyez, il y a un rayonnement qui arrive, alors pour la mise en évidence expérimentale ils n'ont pas utilisé de la lumière optique, ils sont allés dans une zone du spectre où c'est plus facile, c'est les micro-ondes. Ils travaillent à 10 gigahertz.

A 10 GHz, la longueur d'onde c'est 3 cm. Faire des images d'objets petits devant la longueur d'onde, c'est des objets petits devant 3 cm, donc évidemment c'est plus facile à faire !

Ce que vous voyez là c'est un échantillon qui est un échantillon transparent sur lequel vous voyez ces petits traits bleus qui sont des tiges métalliques, et ces tiges métalliques font de l'ordre de quelques millimètres, je répète la longueur d'onde c'est 3 cm, et donc on veut observer des objets beaucoup plus petits que 3 cm et séparés d'une distance beaucoup plus petite que 3 cm.

Comment on fait ? C'est très simple :

On prend un écran, on fait un petit trou dans cet écran, de 1,5 mm de diamètre, et on déplace l'échantillon sous le petit trou. Du coup, le petit trou va éclairer soit un trait métallique, soit il va être placé au-dessus de deux traits métalliques et la lumière va mieux passer.

On collecte la lumière soit en réflexion, soit en transmission comme sur le schéma, et on n'a pas d'image, on a juste pour chaque position de l'échantillon, on a un signal, est-ce que ça a été transmis ou non.

Il faut donc reconstituer l'image en traçant point par point en fonction de la position de l'échantillon le niveau de signal, et là on reconstruit une image.

Et voici un exemple d'image, la largeur des lettres, notée petit  $l$  sur le schéma, c'est 2 mm, et vous voyez qu'avec une longueur d'onde de 3 cm on arrive très bien à reconstituer l'objet. L'image reconstituée avec des micro-ondes est en bas, l'image vue directement avec un appareil photo, en visible, là c'est facile, la longueur d'onde c'est des micromètres, elle est au-dessus.

Alors, lorsqu'ils ont fait ça, ils ont conclu que c'était bien, que ça fonctionnait, mais que ça ne marcherait certainement pas en optique. Pourquoi ? Parce que le petit trou doit être de l'ordre de 100 nm ou 50 nm en optique, et surtout, il faut venir le positionner à 50 nm de la surface, ce qui en 1972 semblait impossible.

En 1984, ça a été fait. C'est Dieter Pohl qui l'a fait. Dieter Pohl travaillait dans les laboratoires IBM à Zurich, et à l'étage au-dessus il y avait Binnig et Rohrer, qui ont eu le prix Nobel en 82 pour le microscope à effet tunnel. Et la raison pour laquelle ils ont eu le prix Nobel, c'est que justement ils savaient contrôler des pointes à l'angström près, l'approcher à l'angström près de la surface. Et pour l'optique il suffit de l'approcher à quelques nanomètres près.

Donc la technologie était prête, l'instrumentation était prête, la démonstration expérimentale a été faite. C'est un travail d'étudiants de master qui est montré sur ce résultat, c'est la première image superrésolue. Ce que vous voyez, en bas, vous voyez l'échelle, c'est 1 micron, une structure dans laquelle il y a des traits métalliques et vous voyez le signal optique, cette courbe assez bruitée, qui n'est pas très belle, elle montre quand même que vous avez des variations de signal qui ont lieu sur des échelles de longueur beaucoup plus petites qu'un micromètre.

La longueur d'onde utilisée dans cette expérience est 500 nm. C'est la démonstration qu'il est possible de faire des images sans être limité par la longueur d'onde.

Voilà un exemple d'application, il y a eu un engouement extraordinaire dès lors que ceci a été démontré, c'était vraiment une barrière dans l'esprit des physiciens qui est tombée, parce que personne ne remettait en cause cette limite de diffraction, c'était vraiment une barrière absolue.

Tant et si bien que d'ailleurs, pour réussir à faire passer son papier, Dieter Pohl l'avait appelé, je ne sais pas si vous l'avez remarqué sur le titre, "Optical Stethoscopy". Un stéthoscope, pourquoi ça, parce que tout un chacun sait qu'un médecin qui utilise un stéthoscope l'amène près du corps du patient, tout le monde est en droit d'attendre qu'il ne confonde pas les bruits du ventre avec ceux du cœur.

Et pourtant, si vous raisonnez en terme de limite de diffraction, il écoute des ondes acoustiques qui se propagent dans le corps humain, c'est en gros de l'eau, c'est 1500 mètres par seconde, on écoute des sons qui sont environ à 1 kilohertz, donc la période c'est 1 milliseconde, multipliée par 1500 mètres, ça fait une longueur d'onde d'1,5 m.

Donc la limite de diffraction vous dit qu'il est impossible de faire des images d'objets plus petits que 1 mètre et demi.

Bien évidemment, ça ne marche pas, le stéthoscope est un capteur qui est beaucoup plus petit que la longueur d'onde et qui vient en champ proche, très près de l'objet à regarder.

Je vous montre ici une image qui est une image prise par un collègue de Rochester, d'un nanotube de carbone. Vous voyez les échelles, c'est une fraction de micron, le carré de la zone observée, du champ de vision. La courbe en dessous est un spectre dans l'infrarouge (c'est de l'effet Raman). Le message ici est que l'intérêt de faire des images dans le visible, donc pas avec des rayons X ou avec des électrons, c'est que l'on a accès à l'information spectroscopique. Et l'information spectroscopique, ça vous dit quelle est la nature des liaisons chimiques, quelle est la nature du matériau.

C'est pour ça qu'il y a un énorme intérêt à faire des images dans la gamme optique – infrarouge avec une résolution spatiale qui ne soit pas limitée par la longueur d'onde.

On vient de voir que le secret de la résolution en imagerie, c'était d'avoir un petit trou, c'est d'ailleurs pour ça que la limite de diffraction n'est pas valable. Il n'y a pas de contradiction, la limite de diffraction est établie quand on fait une image dans le vide. Dès lors qu'on met un trou, on n'est plus dans le vide, il y a de la matière, un trou.

Un autre exemple de système qui permet de confiner la lumière, autre qu'un trou, c'est tout simplement un atome.

Donc vous avez ici sur cette figure de la lumière qui arrive de la gauche, qui se propage vers la droite, c'est une onde plane, donc ce qui est tracé ce sont les lignes de champ du vecteur de Poynting, c'est-à-dire les lignes de champ de l'écoulement de l'énergie, et tout au centre de l'image, vous avez un tout petit disque qui symbolise un atome à résonance. La lumière est exactement à la fréquence de l'atome.

Ce que vous voyez, c'est que les lignes de champ sont captées sur un disque dont le diamètre est de l'ordre de la longueur d'onde, et vous voyez que toutes ces lignes de champ sont concentrées vers l'atome et vont vers l'atome. Ça veut dire que l'énergie est extraordinairement confinée, et donc que l'intensité augmente.

En quelque sorte, un atome est une excellente lentille, ça confine la lumière. Ça la confine Beaucoup mieux que la lentille, puisque la lentille fait une tache d'un micron, l'atome fait une tache qui est de quelques angströms.

Le problème, c'est que ce n'est pas pratique de manipuler un atome. On peut faire la même chose avec une nanoparticule métallique. Ça peut être de l'or, de l'argent, et ce qui se passe ici c'est qu'il y a également une résonance à une certaine fréquence.

La nature de cette résonance est complètement différente. Le petit dessin ici illustre la nature de cette oscillation, ce qui est en jaune représente l'ensemble des électrons de la particule, ce qui est en bleu ce sont les ions, l'ensemble du cristal. Donc vous voyez qu'il y a un mouvement collectif des électrons, tous les électrons se déplacent ensemble et ils vont osciller. Sur l'une des deux images ils sont allés d'un côté, puis sur l'image suivante c'est ce qui se passe une demi-période plus tard, ils sont de l'autre côté, c'est un peu comme une balançoire, ils vont osciller.

Ce qui est intéressant, c'est que cette fréquence d'oscillation est dans la gamme des fréquences optiques. On a donc ici l'équivalent d'un atome, et vous voyez que lorsqu'on regarde les lignes de champ qui tombent sur cet atome il se passe la même chose, c'est confiné.

Mais cette fois-ci c'est une petite particule, on peut la manipuler, on peut la fabriquer, on peut la modifier pour changer les fréquences, et puis surtout ça marche sur une très grande gamme de fréquences.

Voilà un exemple de deux sphères métalliques, et ce petit schéma est là pour vous montrer que le champ est extrêmement intense entre les deux particules, pour montrer qu'il y a une exaltation du champ lorsqu'on envoie une onde plane sur ce type de système.

Alors quoi cela sert-il de confiner les champs. Une application possible, c'est d'utiliser ces champs ultra-intenses pour chauffer de façon extrêmement locale. Il y a des applications aussi diverses que par exemple la thérapie contre le cancer, ou alors les nouvelles générations de disques durs pour le stockage de l'information.

Je vous montre ici une autre application : sur la première ligne vous avez un cristal; la lumière arrive de la gauche, elle est transmise et tout se passe exactement comme si vous aviez une fenêtre. Maintenant si vous augmentez très fortement la puissance de la lumière incidente, pour certains cristaux, on parle de cristaux non-linéaires, vous allez avoir une partie transmise à la même couleur, et puis il y a de la lumière à la fréquence double qui apparaît.

Si par exemple vous envoyez du 800 nm, un laser à 800 nm, vous allez avoir de la lumière à 400 nm qui va sortir. On parle de génération de second harmonique. Ces effets sont des effets qui ont lieu uniquement à très forte intensité.

Il est possible de confiner la lumière dans des nanostructures diélectriques et ça a pour conséquence qu'il est possible d'avoir des champs électriques extrêmement intenses alors même que l'énergie totale utilisée est extrêmement faible.

J'explique ça avec la petite formule qui est en dessous, vous voyez que l'énergie d'un photon, c'est  $h \text{ barre } \omega$ , on ne peut pas avoir moins, est égale au carré du champ fois le volume. Je passe les constantes. Quand bien même il n'y ait que  $h \text{ barre } \omega$ , si le volume est extrêmement petit, vous voyez que le champ électrique devient très intense.

Ça veut dire que l'on va pouvoir observer des effets non-linéaires.

Ça, ça a été fait par des collègues du C2N, le centre de nanosciences et nanotechnologies de l'Université Paris Saclay. Vous avez en haut une image qui montre la structure utilisée pour confiner les champs, pour faire ce petit volume qui va emprisonner la lumière.

Vous avez le faisceau qui arrive de gauche, il passe dans une lentille, il rentre dans ce petit cylindre diélectrique, qui a un diamètre de deux microns environ, ce sont des semiconducteurs. La lumière pénètre et l'intensité incidente est extrêmement faible : il y a en moyenne un photon dans ce petit pilier, pas plus.



Si le nombre moyen de photon est inférieur à un, vous voyez la courbe du dessus. Ce qui est tracé, c'est la réflectivité, donc on envoie de la lumière sur le pilier, et on regarde ce qui est réfléchi. Et ce qui est tracé, c'est la réflectivité en fonction de la longueur d'onde incidente.

Vous voyez que cette réflectivité, qui ne devrait pas varier en fonction de la puissance, si le système était linéaire, eh bien vous voyez qu'elle n'est pas la même.

Tout ce passe comme si votre fenêtre réfléchissait beaucoup, ou pas beaucoup, en fonction de la puissance de la source qui éclaire la fenêtre.

Jean-Jacques Greffet