

partie du dessin du microprocesseur ; la résine qui a été irradiée est dissoute par un réactif chimique ; le silicium ainsi découvert subit divers traitements, puis on enlève toute la résine et on recommence la suite d'opérations avec d'autres masques et d'autres traitements.

La longueur d'onde de la lumière utilisée pour la projection des masques détermine la taille minimale des éléments du circuit et, donc, la densité de transistors sur le silicium et la vitesse du microprocesseur. Aujourd'hui, on obtient des détails de 0,25 micromètre avec une lumière ultraviolette de longueur d'onde égale à 0,248 micromètre. Quelques équipes prévoient d'employer des longueurs d'onde inférieures à 0,1 micromètre, en utilisant des ultraviolets lointains d'environ 0,013 micromètre de longueur d'onde,

et qui seraient émis par un plasma engendré par un laser.

La focalisation du rayonnement ultraviolet lointain nécessite des miroirs à revêtements multicouches. En outre, la projection des masques avec le niveau de détail souhaité requiert un système de projection de grande précision et une bonne planéité du silicium. Ces caractéristiques devront être testées avec des méthodes capables de détecter des défauts de l'ordre du nanomètre (soit l'épaisseur de cinq à dix atomes seulement).

Seul le rayonnement émis par un anneau de stockage de la nouvelle génération est assez focalisé et assez intense, aux longueurs d'onde des ultraviolets lointains, pour réaliser ces tests. Jeffrey Bokor et ses collègues de l'Université de Berkeley étudient une mé-

thode de mesure optique de cette précision en utilisant le rayonnement ultraviolet lointain produit par l'ALS. Ils ont construit un interféromètre où la lumière cohérente émise dans un onduleur est divisée en deux faisceaux : l'un est réfléchi par l'élément optique testé, et l'autre passe à travers un trou minuscule, puis ils sont recombinaés. Comme ils n'ont pas parcouru la même trajectoire, ils sont déphasés (un déphasage de 180 degrés, par exemple, positionnerait les maxima d'amplitude de l'onde transportée par un faisceau là où se trouvent les minima de l'onde transportée par l'autre faisceau, et *vice versa*), et des franges d'interférences apparaissent : ces franges contiennent les informations sur les caractéristiques de l'objet étudié. Par cette méthode, J. Bokor et ses collègues ont démontré que l'on peut fabriquer des miroirs d'une précision suffisante pour projeter des images avec des détails de moins de 0,1 micromètre en ultraviolet lointain.

Des liaisons révélées

Avec le rayonnement synchrotron brillant, on observe même des liaisons entre des atomes ou des molécules et une surface, dont la structure commande les réactions chimiques de surface. De telles réactions interviennent, par exemple, dans la corrosion et dans la catalyse, où l'adsorption de molécules sur une surface favorise leur interaction ou leur dissociation.

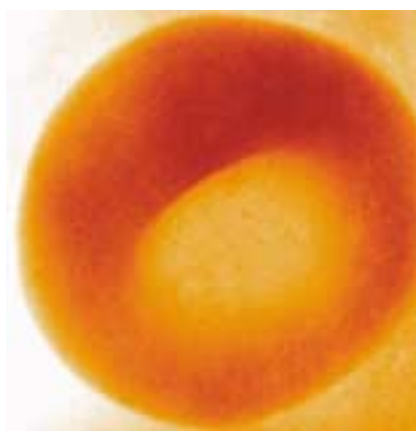
Anders Nilsson et Nial Wassdahl, de l'Université d'Uppsala, ont ainsi cartographié la position des électrons de liaison dans une molécule de diazote (formée de deux atomes d'azote) adsorbée sur une surface de nickel. Ils espèrent utiliser leurs analyses pour améliorer le rendement de la synthèse d'ammoniaque et d'autres molécules azotées utilisées dans des engrais : l'étape lente du procédé actuel est la dissociation du diazote en deux atomes d'azote.

En ajustant avec précision l'énergie des photons X fournis par l'ALS, on excite sélectivement les électrons de liaison de la molécule sans perturber ceux de la surface du nickel. Lorsqu'un électron ainsi excité revient à son énergie initiale, il peut réémettre un photon X par fluorescence : la distribution en énergie de ces photons de fluorescence X permet de reconstituer la structure énergétique et spatiale des liaisons de la molécule de diazote. Une telle expérience requiert une source très intense de



Berkeley Labs

5. LE PARASITE RESPONSABLE DU PALUDISME est visible avec beaucoup de détails sur cette image aux rayons X d'un globule rouge humain infecté (à gauche). La photographie de droite montre une cellule saine.



SOURCES DE RAYONNEMENT SYNCHROTRON LES PLUS BRILLANTES			
NOM	LIEU	ÉNERGIE DES ÉLECTRONS	MISE EN SERVICE
European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)	Grenoble, France	6 GeV	1993
Advanced Light Source (ALS)	Berkeley, Californie	1,5-1,9 GeV	1993
Synchrotron Radiation Research Center (SRRC)	Hsinchu, Taïwan	1,5 GeV	1994
Elettra	Trieste, Italie	2,0-2,4 GeV	1995
Pohang Light Source (PLS)	Pohang, Corée	2-2,5 GeV	1995
Advanced Photon Source (APS)	Argonne, Illinois	7 GeV	1996
MAX II	Lund, Suède	1,5 GeV	1997
SPring-8	Nishi-Harima, Japon	8 GeV	1997
BESSY II	Berlin, Allemagne	0,9-1,9 GeV	1998
Swiss Light Source (SLS)	Villigen, Suisse	2,4 GeV	2001

rayons X, car le rendement de la fluorescence X n'est que de 1 pour 1 000.

On savait que la molécule de diazote se place perpendiculairement à la surface du nickel utilisé comme catalyseur : un seul des deux atomes est lié à la surface. Comme cette liaison est beaucoup plus faible que la liaison entre les atomes d'azote, on pensait que la structure électronique de la molécule n'était pas modifiée : elle restait symétrique. La spectroscopie de fluorescence X a toutefois révélé que la position des électrons dans cette molécule est profondément modifiée par l'adsorption : la molécule n'est plus symétrique, et la liaison entre les atomes est affaiblie.

La radiographie du moustique

Une autre utilisation des rayons X très brillants est l'imagerie en contraste de phase, qui a été mise en œuvre pour la première fois par Anatoly Snigirev et ses collègues à l'ESRF : on peut observer, sans les détruire, des échantillons biologiques, minéralogiques et métallurgiques avec une résolution de l'ordre du micromètre. L'imagerie aux rayons X repose normalement sur le contraste d'absorption : le contraste, qui permet de distinguer les différents constituants de l'objet étudié, provient de la plus grande transparence aux rayons X de certains matériaux, composés surtout d'éléments de faible numéro atomique, tels le carbone, l'azote et l'oxygène, par rapport à d'autres, composés d'atomes plus lourds, qui ont plus d'électrons. Ainsi, sur les radiographies médicales, les os sont représentés par des zones plus claires, parce qu'ils absorbent plus les rayons X que les tissus moins denses qui les entourent.

Comment distinguer dans un objet des zones de densités voisines ou formées d'éléments de faible numéro atomique ? L'imagerie par contraste de phase utilise les variations d'indice de réfraction des diverses substances qui constituent l'échantillon (l'indice de réfraction d'un matériau détermine la déviation d'un rayon lumineux qui le pénètre). Examinons d'abord le trajet des rayons X près des bords d'un échantillon éclairé par un faisceau cohérent et très brillant. Les rayons qui passent juste à côté de l'échantillon ne sont pas déviés, mais ceux qui le traversent le sont un peu : la recombinaison, derrière l'échantillon, de tous ces rayons issus d'un faisceau cohérent, mais légèrement

déphasés, produit des franges d'interférence qui dessinent les contours de l'échantillon. Le même type d'interférences marque les limites internes entre les zones qui ont des indices de réfraction différents. Pour les rayons X, les différences d'indice de réfraction entre les différentes zones d'un échantillon biologique, tel le genou d'un moustique photographié par A. Snigirev, sont très faibles, mais suffisantes pour produire des images (voir la figure 6). On

peut même reconstruire des coupes virtuelles de l'échantillon à partir de plusieurs images de l'échantillon prises sous différents angles.

Des molécules en mouvement

La brillance des rayons X fournis par les anneaux de stockage permet aussi de réaliser des clichés de diffraction cristallographiques en un temps très

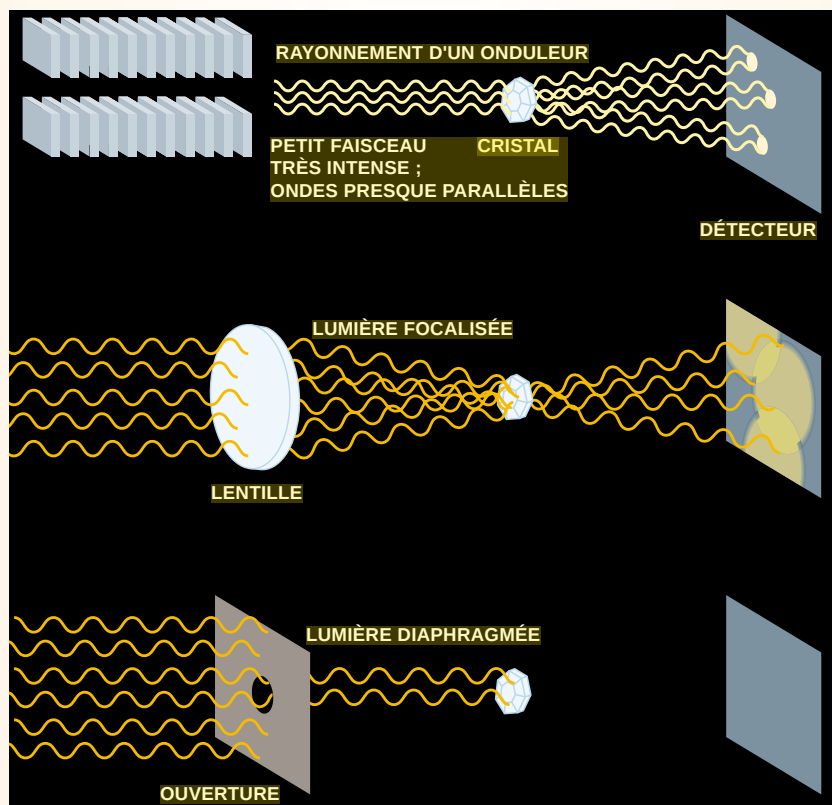
Plus brillant que les étoiles les plus éclatantes

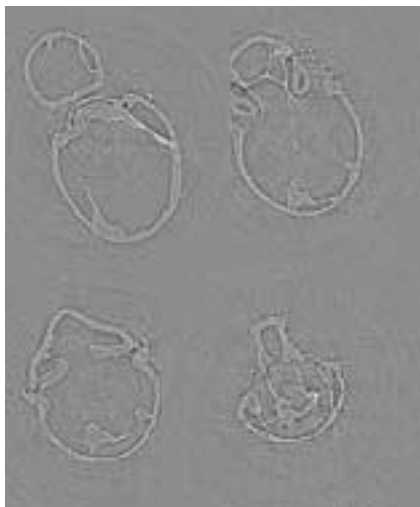
La brillance mesure l'intensité de la lumière par unité de surface dans une direction. Quand deux sources émettent la même quantité de lumière, c'est celle qui émet à partir de la plus petite surface et dans le cône le plus étroit qui est la plus brillante des deux. Ainsi, un laser est non seulement plus brillant qu'une ampoule électrique, mais il peut même être plus brillant que le Soleil, qui est très grand et qui émet la même quantité de lumière dans toutes les directions.

Outre une source de petites dimensions et une faible divergence du faisceau, une forte brillance nécessite l'émission d'un grand nombre de photons par seconde dans un intervalle donné de longueurs d'onde.

Un rayonnement brillant est par ailleurs au moins partiellement cohérent : la plupart des ondes qui le composent sont en phase et peuvent interférer.

La brillance est une propriété intrinsèque d'une source lumineuse. Si on veut l'augmenter en focalisant un rayon sur une petite surface à l'aide d'une lentille ou d'un miroir courbe (au milieu, sur la figure), on augmente la divergence du rayonnement, qui est donc moins concentré. Si on réduit la surface de focalisation sans augmenter la divergence angulaire en utilisant une ouverture de diaphragme minuscule (en bas), on réduit le nombre de photons par seconde dirigé sur l'échantillon et l'on n'augmente pas non plus la brillance.





Analyt Singirev, European Synchrotron Radiation Facility



6. LE GENOU D'UN MOUSTIQUE, vu au microscope à rayons X en contraste de phase, révèle des détails anatomiques de l'ordre de quelques micromètres, malgré l'absence de matériaux aussi denses que les os des vertébrés. À partir d'images prises sous différents angles, on reconstruit des coupes transversales du genou du moustique (à gauche).

court, et de suivre ainsi le comportement dynamique de molécules biologiques. Depuis les travaux de Max Perutz, à Cambridge, dans les années 1930 et 1940, on sait reconstituer, par diffraction des rayons X, la structure géométrique de molécules biologiques, telles les protéines, qui contiennent des milliers d'atomes. Cependant, les images obtenues sont statiques et n'apportent aucune information sur les réarrangements structuraux qui se produisent pendant que les molécules accomplissent leur fonction biologique.

Comment voir les molécules «bouger»? Le rayonnement X de l'ESRF est si brillant qu'une seule impulsion renferme assez de photons pour l'obtention d'un cliché de diffraction à partir duquel on reconstruit une protéine. Pour suivre les réarrangements structuraux de la myoglobine (une protéine des muscles qui absorbe et qui stocke l'oxygène) au cours de la libération d'une molécule d'oxygène et de la fixation d'une autre, Michael Wulff et Keith Moffat ont utilisé un laser afin de couper la liaison chimique entre l'oxygène (en fait, pour cette expérience, le monoxyde de carbone, qui se détache plus facilement de la myoglobine) et la myoglobine. Après cette impulsion laser, ils ont enregistré, avec un intervalle de temps variable à chaque expérience, un cliché de diffraction aux rayons X.

En remettant dans l'ordre chronologique les différentes positions de la molécule de myoglobine déduite de ces clichés cristallographiques, ils ont obtenu un film d'une milliseconde, qui montre que, quelques nanosecondes après le début de la réaction, la molécule de monoxyde de carbone est distante de 40 nanomètres de l'atome de fer de la

myoglobine auquel elle était initialement liée. En outre, à cet instant, le monoxyde de carbone a tourné de 90 degrés par rapport à son orientation initiale. Le monoxyde de carbone peut rester dans cette position d'«attente» durant des centaines de nanosecondes jusqu'à ce que s'établisse une configuration de l'environnement qui lui permet de quitter la protéine et qui le rend disponible pour participer aux réactions chimiques produisant l'énergie nécessaire à la contraction musculaire.

Tous les exemples que nous avons présentés sont les prémices de nouveaux développements techniques : de nombreuses heures de travail seront encore nécessaires avant que l'on utilise de telles méthodes en routine. L'un des éléments qui le permettrait serait un accroissement supplémentaire de la brillance des sources de rayons X. Les ingénieurs imaginent déjà les machines qui produiraient des brillances plusieurs dizaines de fois supérieures à celles dont on dispose aujourd'hui : des lasers à électrons libres, qui sont construits autour d'onduleurs très longs où les photons engendrés en amont interagissent avec des impulsions d'électrons et stimulent l'émission cohérente d'autres photons.

Massimo ALTARELLI dirige le synchrotron *Elettra*, à Trieste. Fred SCHLACHTER travaille dans l'équipe de l'ALS, à Berkeley. Jane CROSS est écrivain scientifique.

Herman WINICK, *Le rayonnement synchrotron*, in *Pour la Science*, janvier 1988. Malcolm R. HOWELLS, Janos KIRZ et David SAYRE, *Les microscopes à rayons X*, in *Pour la Science*, avril 1991.

Ce magazine vous intéresse !



Vous y trouverez :

- ☐ Sciences-actualités
- ☐ L'actualité en astronomie
- ☐ Les actualités biomédicales
- ☐ Nouvelles de l'environnement
- ☐ Le texte intégral des conférences du samedi
- ☐ Le commentaire des expositions permanentes et temporaires
- ☐ Le programme des activités du Palais de la découverte

Je souscris un abonnement à la

REVUE DU PALAIS DE LA
DÉCOUVERTE

Je joins mon règlement par chèque
à l'ordre du

PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
(CCP 9065 48 J PARIS)

Tarif France : 170 F (10 numéros par an)

Tarif étranger : 200 F

par mandat international uniquement
(par avion, supplément de 80 FF)

Abonnement de soutien : 230 F

Nom (M., Mme, Mlle) :

Prénom :

Adresse :

.....

Ville :

Code postal :

Profession :

à retourner avec votre règlement à
Revue du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
Av. Franklin-D.-Roosevelt - 75008 Paris.
Tél. : 01 40 74 80 00