

Les nouvelles sources de rayons X

MASSIMO ALTARELLI • FRED SCHLACHTER • JANE CROSS

Un rayonnement X un milliard de fois plus brillant que celui du Soleil révèle la structure de la matière.

Les sources de rayons X sont sans doute les systèmes techniques qui ont le plus progressé depuis le début des années 1960. Même les microprocesseurs, dont le nombre de transistors double tous les deux ans environ, n'ont pas évolué aussi vite.

La caractéristique exacte qui a été améliorée, dans les sources de rayons X, est leur brillance, c'est-à-dire l'intensité lumineuse par unité de surface de la source et par unité d'angle solide (l'angle solide mesure la dispersion autour d'une direction principale). Les rayons X les plus brillants sont émis par des électrons que l'on fait tourner à des vitesses proches de celle de la lumière dans des anneaux de plusieurs centaines de mètres de diamètre. Les machines de la génération la plus récente, que l'on construit depuis cinq ans, produisent un rayonnement un milliard de fois plus brillant que celui du Soleil et presque 100 fois plus brillant que le rayonnement des machines qui ont été construites auparavant. Malgré leur coût élevé (entre 100 millions et 1 milliard d'euros chacune), huit des nouvelles sources fonctionnent déjà, et deux autres seront bientôt mises en service. Elles s'ajoutent aux 40 machines plus anciennes qui fonctionnent dans le monde.

À quoi servent des rayons X très brillants ? En raison de leur courte longueur d'onde, on peut les utiliser pour sonder de petits objets, de la taille des molécules, voire des atomes. En outre, dans de nombreuses situations, plus la brillance est grande, plus les détails observables sont petits. Enfin, comme les intensités sont considérables, on peut filtrer les faisceaux et ne conserver que des longueurs d'onde très proches d'une valeur fixée, afin d'exciter sélectivement

une molécule à une fréquence particulière, par exemple. Le rayonnement émis par les sources puissantes de rayons X couvre les longueurs d'onde nécessaires pour étudier les structures atomique et électronique de la matière, qui déterminent presque toutes les propriétés d'un matériau : sa résistance, son magnétisme, sa réactivité chimique, sa conductivité thermique ou sa conductivité électrique.

Le rayonnement synchrotron

Depuis plus d'un siècle, avec l'établissement des équations fondamentales de l'électromagnétisme par James Maxwell, puis les travaux de Joseph Larmor et d'A. Liénart, on sait que les particules chargées émettent un rayonnement électromagnétique chaque fois que leur vitesse varie, en valeur ou en direction. Des particules qui se déplacent sur une trajectoire circulaire à une vitesse constante émettent donc un rayonnement continu, le rayonnement synchrotron. Il fut nommé ainsi parce que la première observation en a été faite, il y a 50 ans, dans un accélérateur de particules nommé synchrotron. Toutefois, il est émis dans des conditions variées : on a ultérieurement découvert qu'il est produit naturellement dans l'espace, par exemple dans la nébuleuse du Crabe, où des électrons sont accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière dans des champs magnétiques intenses.

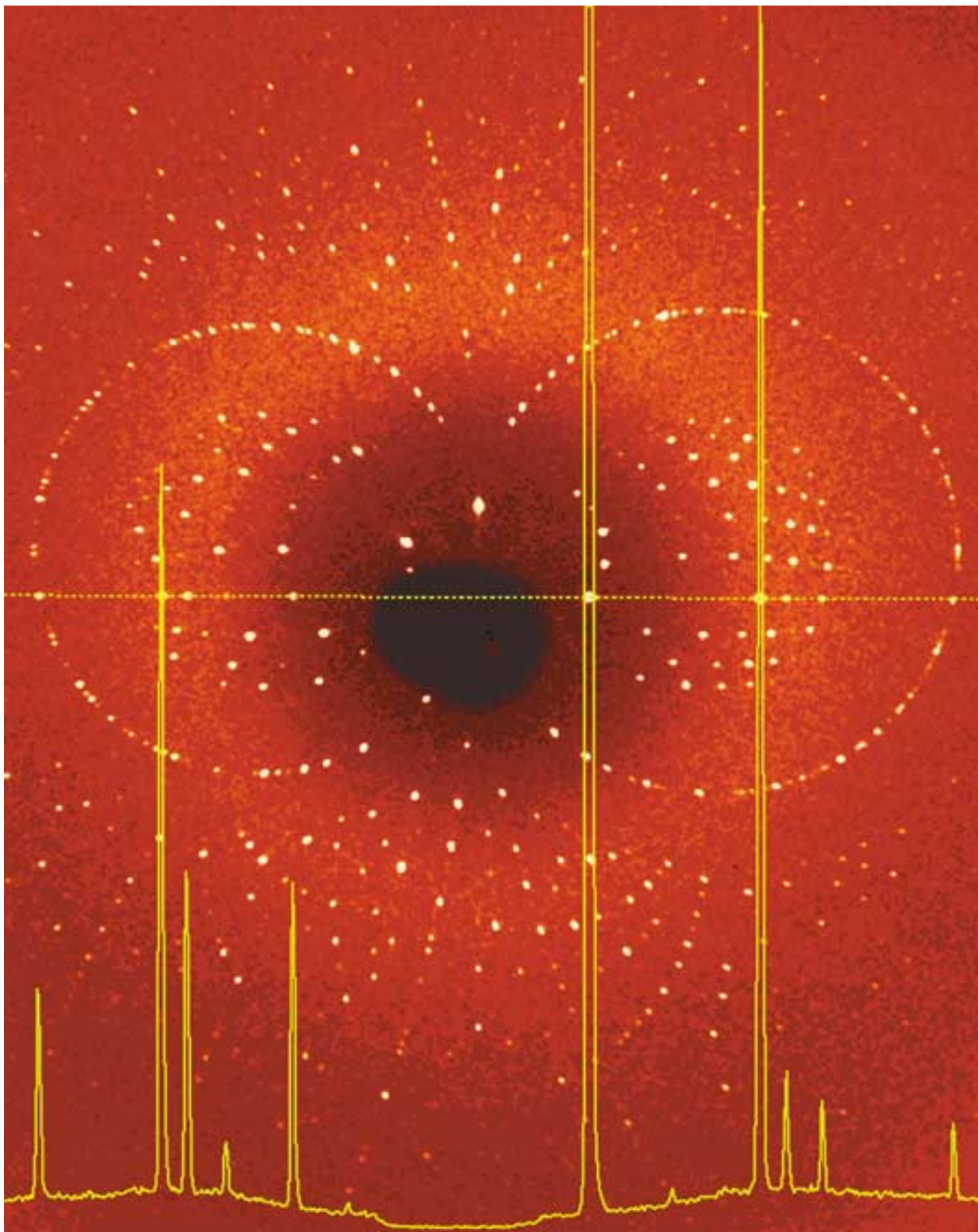
Un synchrotron est constitué d'une enceinte annulaire où l'on fait le vide, d'une circonférence qui atteint plusieurs kilomètres ; des aimants répartis sur la circonférence dévient et focalisent un faisceau de particules électriquement chargées qui tournent dans l'enceinte.

Lorsque les particules circulent à des vitesses bien inférieures à celle de la lumière, elles émettent dans toutes les directions un rayonnement peu intense et de basse fréquence ; lorsque leur vitesse s'approche de celle de la lumière, l'intensité et la fréquence du rayonnement émis augmentent, et le faisceau est alors émis tangentiellement à la trajectoire des particules. Son intensité est particulièrement grande pour les particules de faible masse, tels les électrons.

Pour obtenir des rayons X très brillants, on utilise des synchrotrons spécialisés, nommés anneaux de stockage, où des électrons circulent pendant des heures sur la même orbite, à une vitesse constante, voisine de celle de la lumière (99,9999996 pour cent de la vitesse de la lumière dans la source synchrotron européenne, à Grenoble, l'ESRF). Les particules acquièrent leur vitesse dans un accélérateur annexe, souvent un autre synchrotron, avant d'être injectées dans l'anneau de stockage (voir la figure 2).

Comme l'émission du rayonnement synchrotron fait perdre de l'énergie aux électrons, on les accélère dans des cavités radiofréquence, réparties autour de l'anneau de stockage, où règne un champ électromagnétique oscillant. Cette accélération a lieu 350 millions de fois par seconde, quand les paquets d'électrons traversent la cavité, au maximum d'intensité du champ électromagnétique. Chaque paquet d'électrons a l'épaisseur d'un cheveu et environ un centimètre de long. Des centaines de paquets tournent simultanément dans l'anneau de stockage, tel un chapelet de minuscules perles enfilées sur un collier géant.

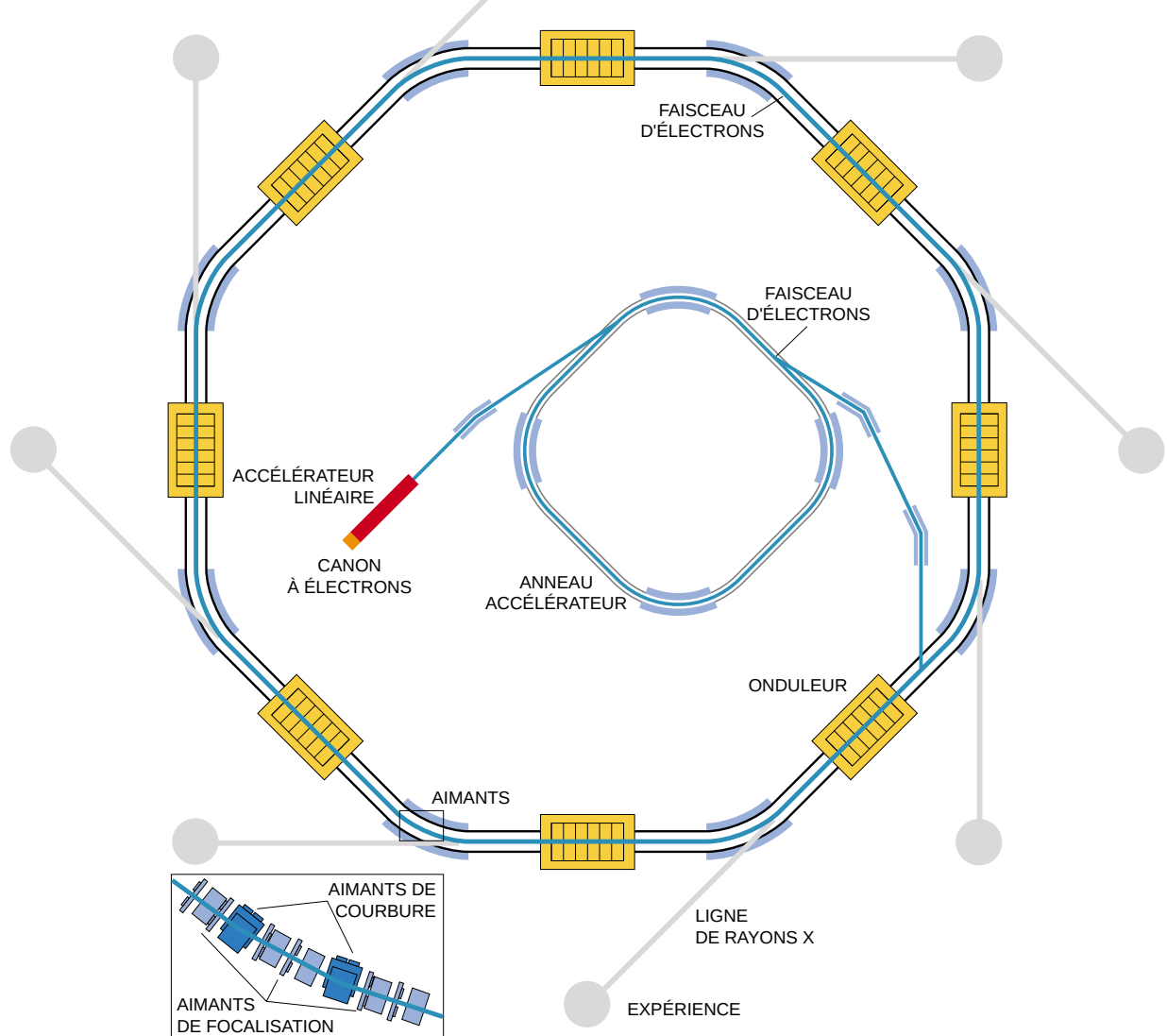
En fait, les anneaux de stockage sont de forme polygonale, avec jusqu'à 50 sections droites reliées par des



Michael Wulff, European Synchrotron Radiation Facility et Keith Moras, University of Chicago

1. CE CLICHÉ DE DIFFRACTION est celui de la molécule de myoglobine, une protéine des muscles qui capte et stocke l'oxygène pour fournir ensuite de l'énergie aux muscles. L'image a été obtenue

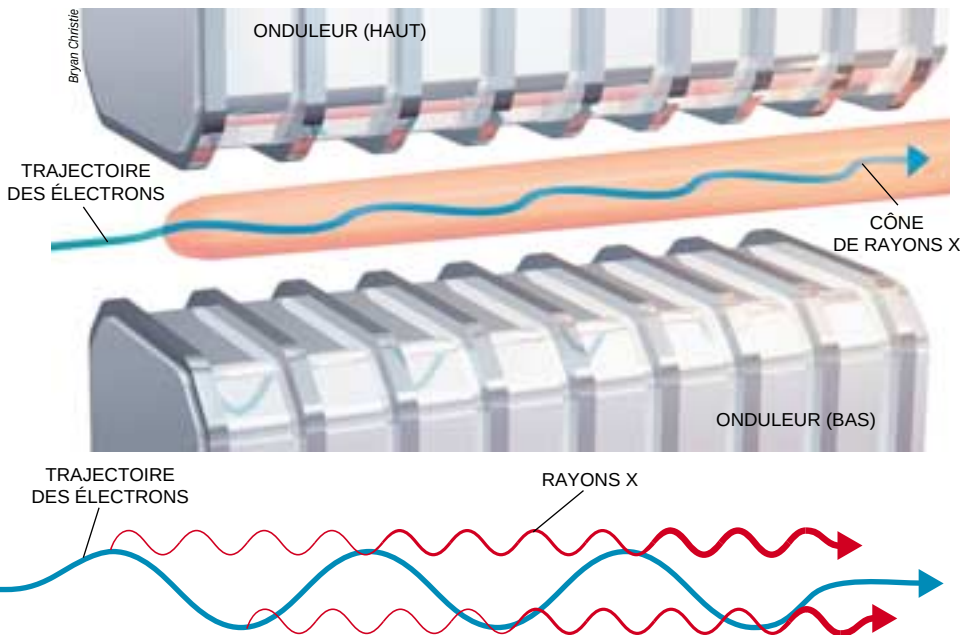
avec une seule impulsion, très brève, de rayons X très brillants. La courbe jaune représente les variations de l'intensité des rayons X le long de la ligne horizontale en pointillés.



Bryan Christie et Dmitry Kasany

2. DANS LES NOUVELLES SOURCES DE RAYONS X, un courant d'électrons circule à une vitesse voisine de celle de la lumière pendant plusieurs heures de suite. Les électrons créés par un canon à électrons sont accélérés par un accélérateur linéaire, puis ils pénètrent dans un petit anneau accélérateur, qui augmente encore leur énergie. Finalement, les particules sont injectées dans l'anneau de stockage, où elles tournent en petits paquets de l'épaisseur d'un cheveu, chacun émettant une impulsion électromagnétique très brillante pendant qu'il parcourt l'une des sections courbes. La trajectoire des

électrons est guidée par des aimants (en bleu) disposés en réseaux (détail en bas à gauche) : des aimants de focalisation maintiennent les électrons en minces paquets concentrés ; les autres aimants incurvent la trajectoire. Le rayonnement est aussi produit dans des onduleurs (en jaune), disposés sur les sections droites de l'anneau. Une partie du rayonnement émis dans les sections courbes et la plupart du rayonnement émis dans les onduleurs quitte l'anneau tangentiellement à celui-ci : on le récupère dans des « lignes de lumière » sur lesquelles on installe des expériences (cercles gris).



Lawrence Berkeley National Laboratory

3. UN ONDULEUR crée un champ magnétique alterné le long de la trajectoire des électrons. En sinuant autour de la direction moyenne de propagation, les électrons émettent des rayons X très brillants. Les ondes émises des différents points de la trajectoire (ligne bleue) restent dans un cône étroit (en rose) et interfèrent. Seules les ondes de certaines fréquences interfèrent constructivement : elles se superposent, de sorte que tous leurs maxima et leurs minima se trouvent aux mêmes endroits (en bas à gauche). Ces fréquences dépendent de la distance (variable) entre les deux rangées d'aimants de l'onduleur (ci-dessus).

sections légèrement courbes. Deux types d'électro-aimants focalisent le faisceau et un troisième l'incurve. À chaque changement de direction d'un paquet d'électrons, ceux-ci émettent une brève bouffée de rayons X, tangentielllement à leur trajectoire : on récupère ce rayonnement dans une «ligne de rayons X», à l'extrémité de laquelle on installe des expériences.

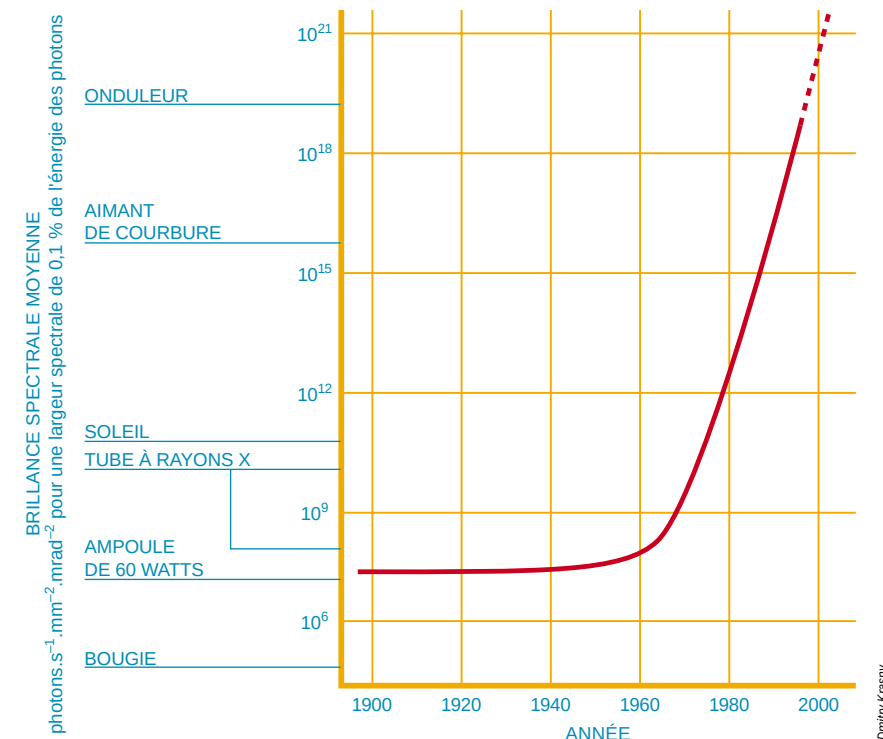
Pourquoi la brillance des rayons X a-t-elle tant augmenté ? D'une part, on dispose aujourd'hui de microprocesseurs puissants et peu coûteux qui permettent la conception, la modélisation, la construction et la commande de composants plus performants pour les anneaux de stockage : on ajuste ainsi beaucoup mieux le faisceau d'électrons, que l'on positionne avec une précision de l'ordre de quelques centièmes de sa largeur. Le faisceau, très stable, émet des rayons X nets et brillants.

D'autre part, les nouveaux anneaux de stockage sont équipés d'onduleurs, qui transforment certaines parties droites de la trajectoire du faisceau en sinusoïdes de faible amplitude, mais de grande fréquence. Le cœur d'un onduleur est une double rangée d'aimants permanents qui créent une alternance de champs magnétiques très intenses dirigés vers le haut et vers le bas, perpendiculairement au faisceau d'électrons. Comme les électrons émettent des rayons X à chaque changement de direction, leur passage dans un onduleur provoque l'émission d'un rayonnement intense (voir la figure 3).

À chaque changement de direction, le rayonnement est émis dans un cône étroit. Les ondes s'ajoutent, se renforçant ou s'annulant selon leur longueur d'onde, de sorte que l'intensité est augmentée à certaines longueurs d'onde. En outre, le rayonnement est généralement partiellement cohérent : les maxima et les minima des ondes X tendent à coïncider. En ajustant la distance entre les deux rangées d'aimants, on ajuste les fréquences renforcées par l'onduleur, une fréquence fondamentale et ses multiples.

L'observation des parasites

Avec leurs courtes longueurs d'onde, leur brillance et leur cohérence partielle, les rayons X émis par les anneaux de stockage les plus récents permettent aujourd'hui d'étudier des objets et des phénomènes qui, en raison de leur taille



4. LA BRILLANCE DES RAYONS X a considérablement augmenté depuis la première utilisation du rayonnement émis par un accélérateur de particules, dans les années 1960. L'utilisation de dispositifs magnétiques nommés onduleurs a multiplié cette brillance par 100 environ.

ou de leur opacité, n'étaient pas analysables il y a seulement cinq ou six ans. Nous examinerons quelques applications, qui montrent à la fois la diversité des sujets abordés et celle des utilisations du rayonnement synchrotron.

Selon l'Organisation mondiale de la santé, le paludisme tue 2,7 millions de personnes par an, surtout des enfants. Cette maladie est causée par des parasites des globules rouges, le plus meurtrier étant *Plasmodium falciparum* qui est transmis par la femelle du moustique anophèle. Il envahit les globules rouges de l'hôte infecté, où il se divise et où il digère l'hémoglobine, dans une vacuole nutritive, pour produire la plupart des acides aminés nécessaires à son métabolisme. On ne connaît pas de vaccin efficace, et la résistance de *Plasmodium falciparum* aux médicaments disponibles s'accroît.

Cathleen Magowan, Werner Meyer-Ilse et John Brown, du Laboratoire Lawrence Berkeley, ont utilisé les rayons X de l'ALS, l'anneau de stockage installé à Berkeley, en Californie, pour étudier les étapes du cycle de reproduction du parasite et l'action de divers médicaments. À l'aide de rayons X d'une longueur d'onde de 2,4 nanomètres, ils ont obtenu des images de globules rouges infectés avec une résolution cinq à dix fois supérieure à celle

d'un microscope en lumière visible (voir la figure 5). De très petites structures apparaissent dans les cellules infectées et, même, à l'intérieur du parasite. Le bon contraste des images permettait aussi des mesures précises et directes de la répartition des masses à l'intérieur du parasite. Ainsi, C. Magowan a suivi la redistribution de l'hémoglobine, du cytoplasme du globule rouge vers la vacuole nutritive du parasite, dans les conditions normales et au cours de traitements médicamenteux qui, inhibant les enzymes de digestion du parasite, provoquent un gonflement de la vacuole nutritive par accumulation d'hémoglobine non digérée et peuvent ainsi tuer le parasite.

Plus de transistors

Des faisceaux de rayons X brillants et partiellement cohérents sont aussi utiles, indirectement, pour l'amélioration des performances des microprocesseurs. Les microprocesseurs sont des assemblages de transistors gravés à la surface de pastilles de silicium. Cette gravure est faite en plusieurs étapes : le silicium est recouvert de résine photosensible, sur laquelle on projette, généralement avec de la lumière ultraviolette, l'image d'un masque qui reprend une

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-

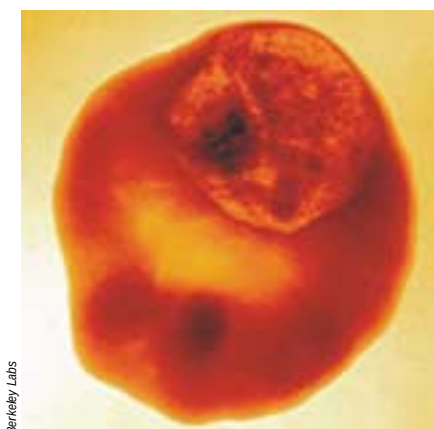
thode de mesure optique de cette précision en utilisant le rayonnement ultraviolet lointain produit par l'ALS. Ils ont construit un interféromètre où la lumière cohérente émise dans un onduleur est divisée en deux faisceaux : l'un est réfléchi par l'élément optique testé, et l'autre passe à travers un 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

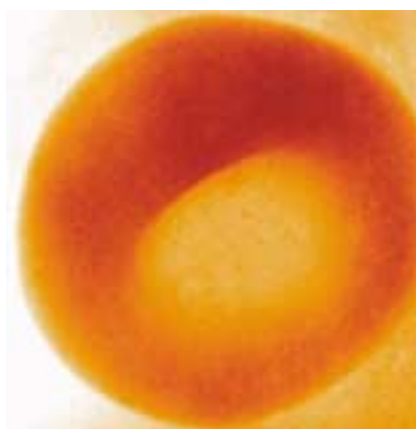
Avec le rayonnement synchrotron brillant, on observe même des liaisons entre des atomes ou des molécules et une surface, dont la structure commande les réactions chimiques de surface. De telles réactions interviennent, par exemple, dans la corrosion et dans la catalyse, où l'adsorption de molécules sur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

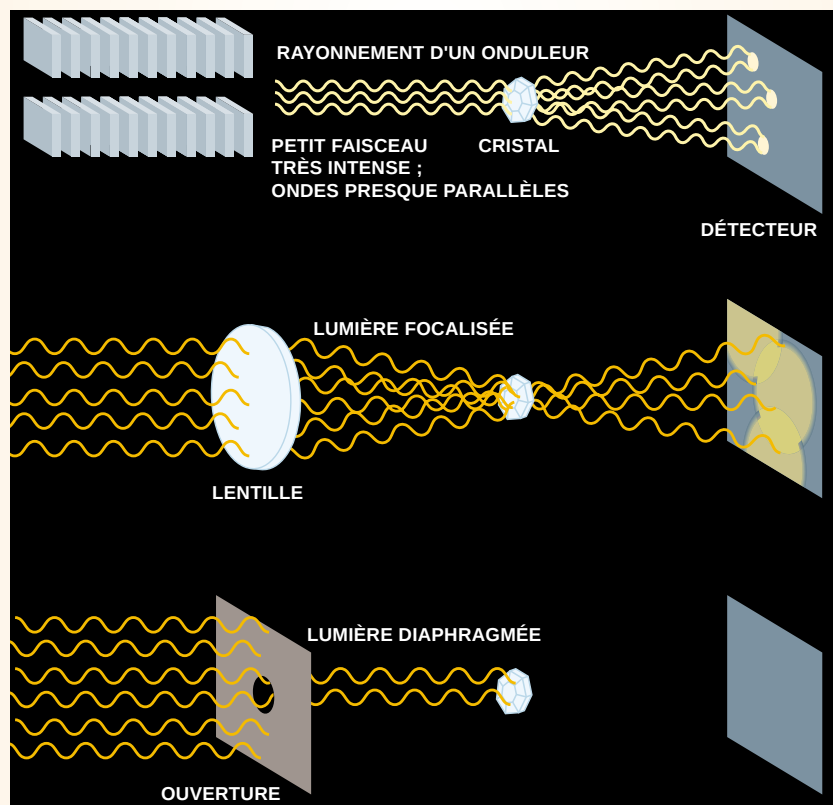
Plus brillant que les étoiles les plus éclatantes

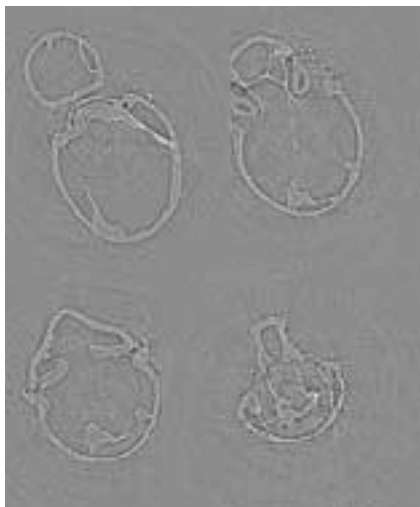
La brillance mesure l'intensité de la lumière par unité de surface dans une direction. Quand deux sources émettent la même quantité de lumière, c'est celle qui émet à partir de la plus petite surface et dans le cône le plus étroit qui est la plus brillante des deux. Ainsi, un laser est non seulement 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.

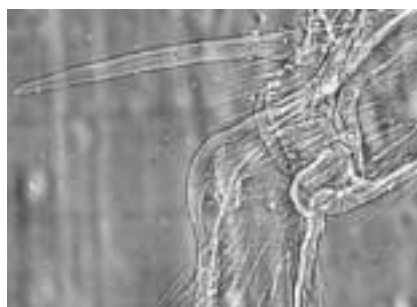
Un rayonnement brillant est par ailleurs au moins partiellement cohérent : la plupart des ondes qui le composent sont en phase et peuvent interférer.

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 dirigés sur l'échantillon et l'on n'augmente pas non plus la brillance.





Analyt Sngirev, 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 pendant 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'ondeurs 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

