

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.

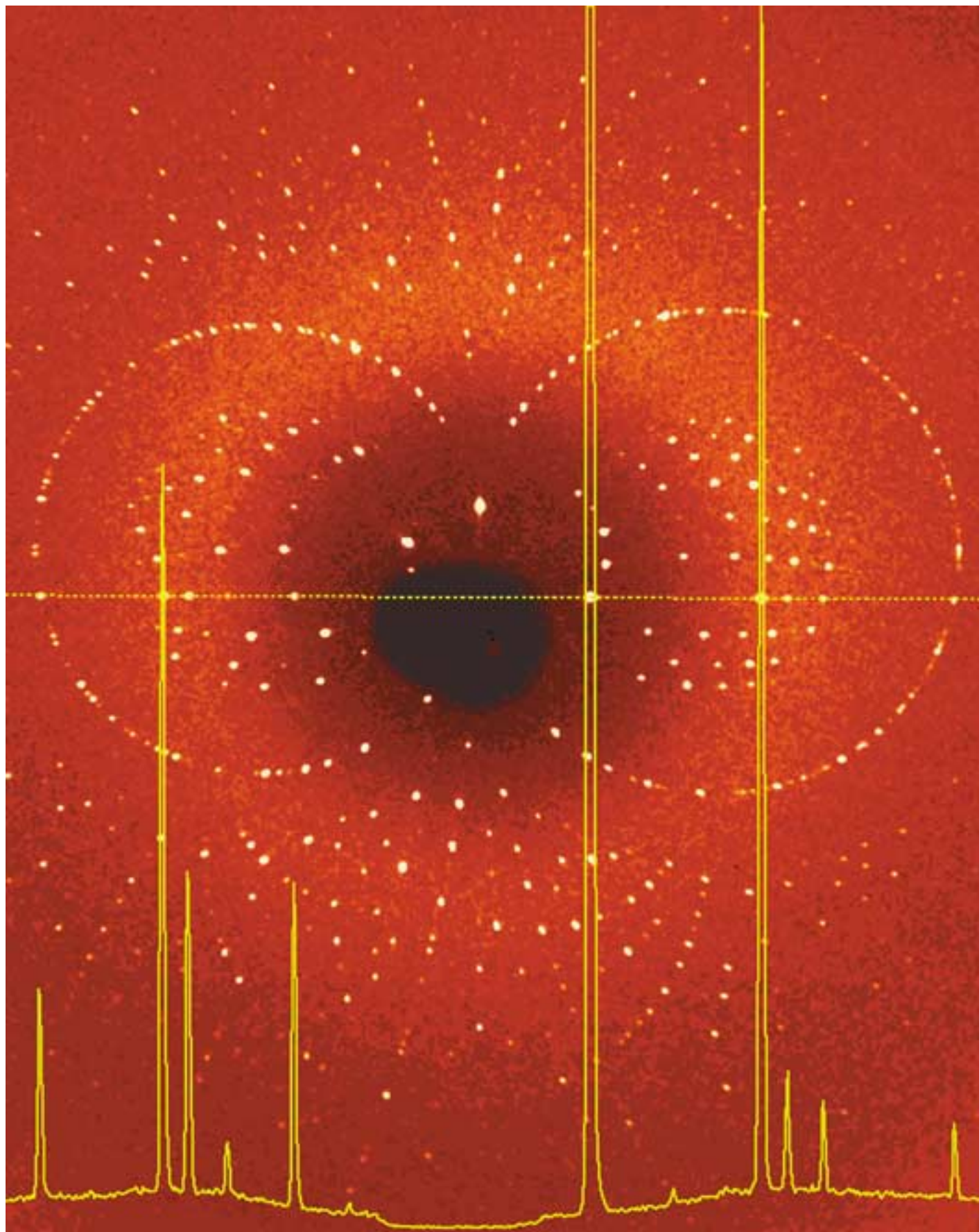
Un synchrotron est constitué d'une enceinte annulaire où l'on fait le vide, d'une circonférence qui atteint plusieurs kilomètres ; des aimants répartis sur la circonférence dévient et focalisent un faisceau de particules électriquement chargées qui tournent dans l'enceinte.

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.

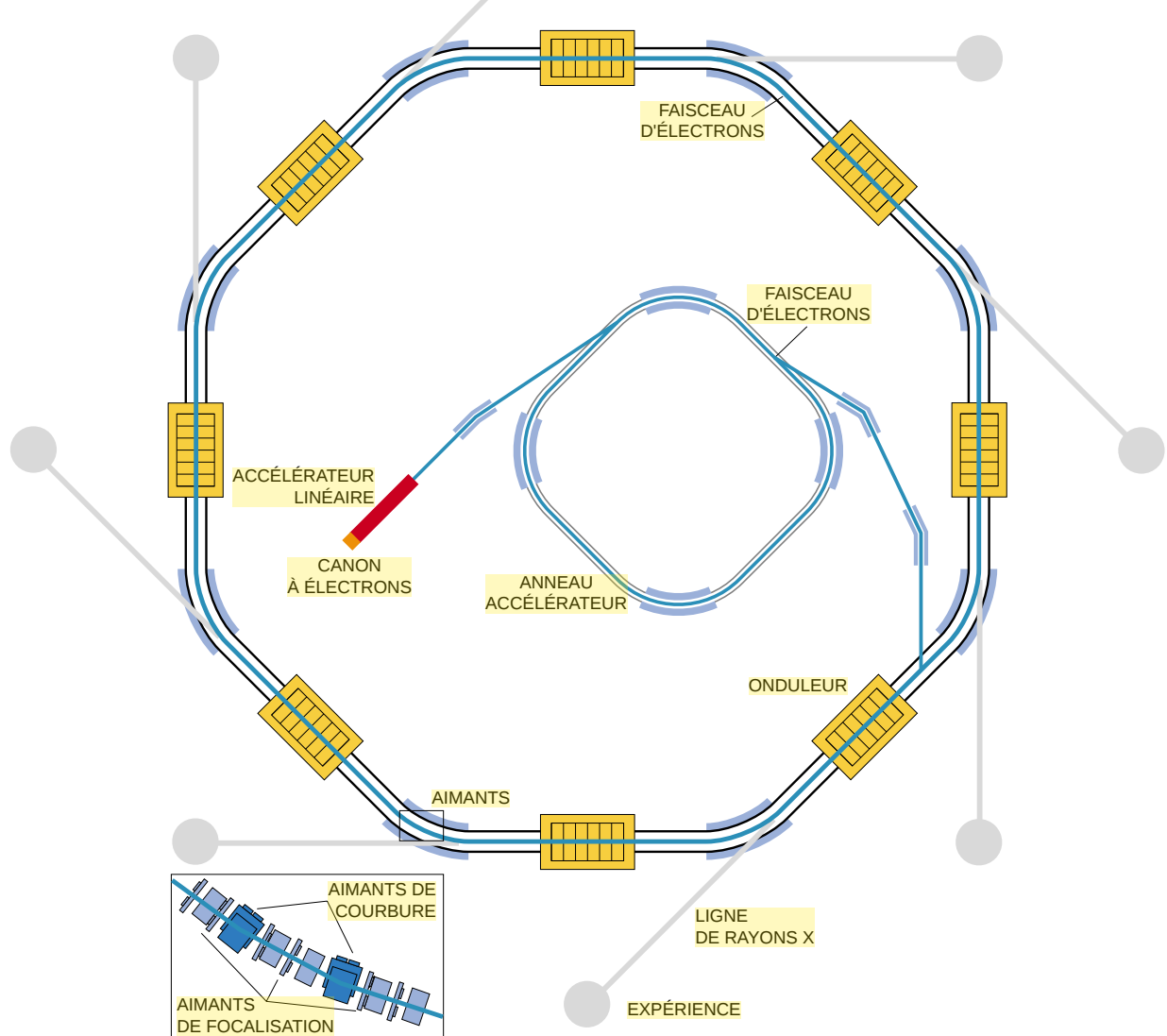
En fait, les anneaux de stockage sont de forme polygonale, avec jusqu'à 50 sections droites reliées par des



Michael Wulff, European Synchrotron Radiation Facility et Keith Moffat, 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

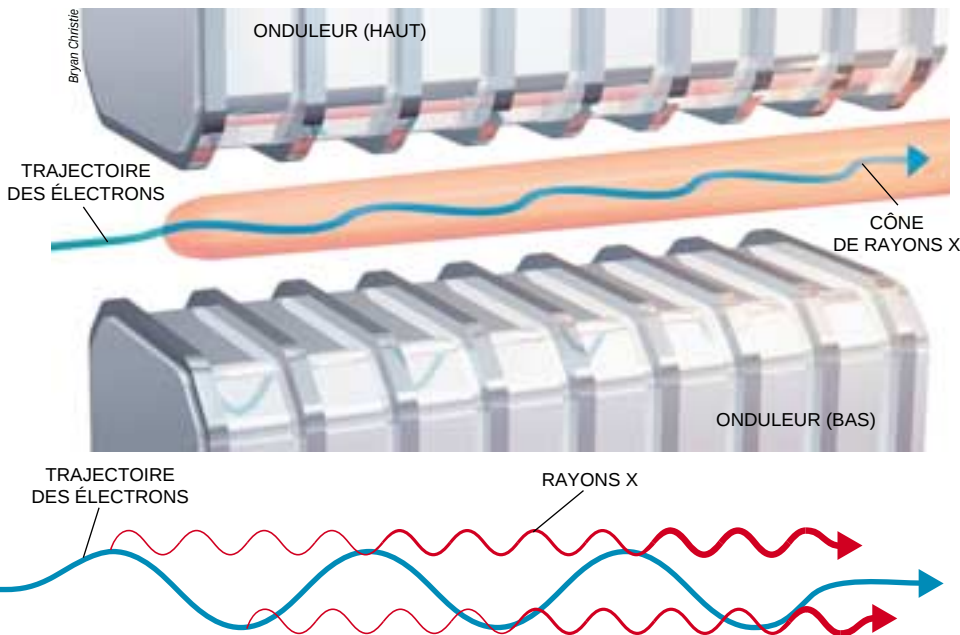
avec une seule impulsion, très brève, de rayons X très brillants. La courbe jaune représente les variations de l'intensité des rayons X le long de la ligne horizontale en pointillés.



Bryan Christie et Dmitry Kasny

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).