ThomX : un démonstrateur de source compacte de rayons X

Christelle Bruni⁽¹⁾, Marie Jacquet⁽¹⁾, Alexandre Loulergue⁽²⁾,
Hugues Monard⁽¹⁾ (monard@lal.in2p3.fr) et Fabian Zomer⁽¹⁾

(1) Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Université Paris-Sud et IN2P3/CNRS, 91898 Orsay Cedex

(2) Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, Saint-Aubin, BP 48, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex

La montée en puissance des lasers et l'accroissement de la finesse des cavités optiques permettent aujourd'hui le développement de sources de rayons X fondées sur la diffusion Compton inverse. Ces sources compactes fourniront des faisceaux de haute intensité, accordables en énergie dans la gamme 20-100 keV, utilisables dans divers domaines : biomédecine, préservation de l'héritage culturel, science des matériaux notamment.

Elles fonctionneront dans un environnement d'exploitation plus facile d'accès.

Des méthodes expérimentales utilisées aujourd'hui uniquement auprès des sources de rayonnement synchrotron pourront être adoptées dans le cadre d'un laboratoire, d'un hôpital ou d'un musée.

ThomX est le projet français dans ce domaine.

Les rayons X sont des photons d'énergie de ~ 100 eV à ~ 100 keV ou, de façon équivalente, un rayonnement de longueur d'onde comprise entre ~ 10 et $\sim 0,01$ nm. Ils sont produits de différentes façons (détaillées dans l'encadré 1) et sont utilisés dans de nombreux domaines scientifiques et techniques (voir encadré 2, p. 12). Une source de lumière est principalement caractérisée par sa *brillance* : c'est le nombre de photons émis par seconde, par unité d'aire de la source, par unité d'angle solide et dans une largeur de bande d'énergie (bw) de 0,1%. La brillance quantifie l'intensité d'une source, en tenant compte de sa pureté spectrale et de son ouverture angulaire.

Les plus performantes des sources conventionnelles et compactes ont une brillance de 10^8 - 10^{10} ph/s/mm²/mrad²/0,1%bw, à une énergie de rayons X fixe et limitée aux pics de fluorescence de l'anode ; elles ne dépassent pas 10^4 ph/s/mm²/mrad²/0,1%bw au-dessus de 60 keV (fig. 1) et, pour une large classe d'applications, le trop faible flux nécessite un temps d'exposition prohibitif.

Les sources de rayonnement synchrotron sont les plus performantes en termes de brillance [1] ; elles peuvent fournir jusqu'à 10^{21} ph/s/mm²/mrad²/0,1%bw (fig. 1) et sont actuellement les seules machines disponibles pour réaliser les analyses et les recherches les plus ambitieuses nécessitant des X dans la gamme 10-100 keV. Mais les synchrotrons sont de grandes installations dont l'accès est limité (compte tenu du grand nombre d'utilisateurs potentiels), et qui présentent de fortes contraintes d'utilisation (comme, par exemple, le coût et/ou le danger liés à la nécessité de transporter une œuvre d'art ou des cristaux refroidis à l'azote liquide).

Les sources Compton compactes (SCC) sont des machines de taille assez modeste (~ 100 m²) qui visent une forte brillance

1. Brillances typiques des différentes sources de rayons X : synchrotrons (la ligne biomédicale de l'ESRF est en vert), sources conventionnelles (tubes X à anodes de Cu, Mo, W) et projets de sources Compton compactes (SCC, en rose).

($\sim 10^{11}$ - 10^{12} ph/s/mm²/mrad²/0,1%bw et jusqu'à 10^{15} pour les projets utilisant un accélérateur linéaire supraconducteur), accordables en énergie dans la gamme 20-100 keV. De nombreuses expériences effectuées aujourd'hui uniquement auprès de synchrotrons pourront ainsi être réalisées au sein d'un laboratoire, d'un musée ou d'un hôpital.

Sources Compton compactes

Dans une diffusion Compton inverse (fig. 2), un électron d'énergie E_e cède une fraction de son énergie à un photon de faible énergie E_L qui, dans le référentiel du laboratoire, est rétrodiffusé avec l'énergie :

$$E_X = 2 \gamma^2 E_L (1 + \cos \theta_c) / (1 + \gamma^2 \theta^2),$$

$$(\gamma \gg 1 \text{ et } E_L \ll m_e c^2) \quad (1),$$

où $\gamma = E_e / m_e c^2$ est le facteur de Lorentz de l'électron, m_e sa masse, θ_c et θ sont respectivement l'angle d'incidence et l'angle de diffusion par rapport à la direction de l'électron incident.

L'équation (1) implique une dépendance univoque entre l'énergie E_X d'un photon rétrodiffusé et son angle de diffusion θ : les rayons X présentent une distribution en forme de cônes concentriques, où l'énergie diminue lorsqu'on s'éloigne du centre. Ceux produits vers l'avant ($\theta = 0$) ont donc le maximum d'énergie. Ainsi, par un simple diaphragme placé sur l'axe du cône Compton, une bande d'énergie peut être sélectionnée. La figure 3 illustre cette corrélation.

Avec les progrès des lasers, des cavités optiques et des accélérateurs, il est maintenant possible de produire des flux de rayons X supérieurs à 10^{12} ph/s à condition que la fréquence de répétition f_{rep} soit suffisamment élevée, c'est-à-dire dans la gamme 10-100 MHz. Donnons des ordres de grandeur : 10^{13} ph/s sont obtenus pour $f_{\text{rep}} = 20$ MHz, un paquet d'électrons de 1 nC, un paquet de photons de 10 mJ, et une taille transverse des paquets d'électrons et de photons au point d'interaction (IP) de l'ordre de 40 μm .

► Génération des rayons X

encadré 1

Les rayons X dans la gamme d'énergie 100 eV à 10 keV sont qualifiés de « mous », ceux de haute énergie (~ 10 à 100 keV) sont dits « durs ». Ils peuvent être générés de trois façons différentes :

- Les « tubes à rayons X » sont des *sources conventionnelles*, où des électrons accélérés par une différence de potentiel de ~ 10 à 150 kV frappent une anode métallique (en tungstène, cuivre ou molybdène). Du freinage des électrons résulte un spectre continu de photons jusqu'aux rayons X durs, auquel se superposent des raies de fluorescence spécifiques de l'anode utilisée. Le freinage des électrons produit un dégagement important de chaleur, qui limite le flux de ce type de source.
- En stockant des électrons dans un accélérateur circulaire, la courbure des orbites entraîne un rayonnement dit *synchrotron*. Des électrons de quelques GeV émettent des photons dans le domaine des X. Les sources de rayonnement de troisième génération (SOLEIL, ESRF...) utilisent principalement le rayonnement produit par des éléments spécifiques appelés *onduleurs*.
- Lorsqu'on envoie un faisceau laser classique (photons de ~ 1 eV) sur des électrons ultra-relativistes, ce choc produit des photons rétrodiffusés de haute énergie. C'est l'*effet Compton inverse*. On obtient ainsi des rayons X durs de quelques dizaines de keV, avec un laser à 1 eV et des électrons de quelques dizaines de MeV (c'est-à-dire environ 100 fois moins énergétiques que ceux utilisés pour produire le rayonnement synchrotron). Cette diffusion Compton permet donc de concevoir des sources de rayons X compactes (installations de ~ 100 m²), qui sont l'objet du présent article.

(a)

(b)

3. Répartition en énergie et en angle des photons Compton rétrodiffusés. (a) Énergie des photons Compton en fonction de leur angle de diffusion pour des collisions frontales d'impulsions laser infrarouge de longueur d'onde 1,06 μm ($E_L = 1,17$ eV) avec des paquets d'électrons de 50 MeV ($\gamma \sim 100$). (b) Illustration schématisque des cônes concentriques du faisceau Compton. IP est le point d'interaction électron/photon laser.

2. Schéma du processus de diffusion Compton inverse.

Source utilisant un anneau de stockage

Source utilisant un Linac seul

4. Schémas de principe des SCC de haut flux avec et sans anneau de stockage, respectivement (a) et (b). (Linac = accélérateur linéaire).

► Utilisation des rayons X

encadré 2

- La gamme de longueurs d'onde des rayons X s'étendant de la dimension d'un atome ($\sim 0,1$ nm) à celle d'une molécule (quelques nm), la *diffraction* des rayons X permet l'étude de la structure de très nombreux composés chimiques et de matériaux totalement ou partiellement cristallisés. Par ailleurs, l'énergie élevée des rayons X conduit à l'ionisation des matériaux irradiés, générant de la *fluorescence* X utilisée pour des analyses chimiques.
- Les X durs traversent facilement la matière peu dense, constituée d'éléments légers (nombre atomique Z faible), tandis qu'ils sont absorbés par la matière dense. Cette propriété permet l'*imagerie par contraste d'absorption* (la radiographie et la tomographie habituelles).
- L'absorption des rayons X par la matière biologique est faible et constitue une limitation de la radiographie. Pour améliorer les images, la réfraction, la diffraction et les interférences de rayons X sont utilisées dans l'*imagerie par contraste de phase*. Une meilleure visibilité des frontières entre des domaines présents dans un échantillon est ainsi obtenue en exploitant la phase de l'onde X. Pour cela, la source doit être transversalement quasi cohérente. Cette technique utilise les différences de phase résultant des variations spatiales de l'indice de réfraction au sein de l'échantillon. Comme le rayonnement se propage au-delà de l'échantillon, les portions de la surface d'onde qui se sont propagées de part et d'autre d'une frontière interne de l'échantillon produisent une série de franges par diffraction de Fresnel.
- La *radiothérapie* est une autre grande utilisation du rayonnement X. Les cellules tumorales se divisant plus rapidement que les cellules saines, sont plus sensibles aux rayonnements ionisants, et il est possible d'éliminer une tumeur en la soumettant à une forte dose de rayonnement.

>>>

Deux conceptions de machines fondées sur la rétrodiffusion Compton permettent d'atteindre un taux de répétition élevé, selon que les photons laser entrent en collision avec des électrons provenant d'un petit anneau de stockage d'une dizaine de mètres de périmètre (fig. 4a), ou avec ceux d'un accélérateur linéaire (Linac) supraconducteur (fig. 4b) – l'une et l'autre présentant des avantages et des difficultés techniques spécifiques.

Dans le cas d'un anneau de stockage, f_{rep} est déterminée par la fréquence de révolution des électrons dans l'anneau, permettant d'obtenir une brillance de 10^{11} – 10^{12} ph/s/mm²/mrad²/0,1%bw (bas du rectangle rose de la figure 1) et un flux de 10^{12} – 10^{13} ph/s.

Dans le schéma utilisant un accélérateur linéaire sans anneau de stockage, la fréquence f_{rep} est déterminée par la fréquence de la source d'électrons qui doit nécessairement être un dispositif supraconducteur. Bien que des projets d'injecteur d'électrons de haute performance soient actuellement en développement [2], la technologie supraconductrice dans ce domaine n'est pas encore assez mature pour atteindre à la fois les cadences et le nombre d'électrons requis.

Dans les deux schémas, les impulsions d'un laser de faible puissance moyenne, de fréquence f_{rep} , sont amplifiées puis accumulées et stockées dans une cavité optique du type Fabry-Perot de finesse très élevée. (La finesse est le nombre moyen d'allers-retours qu'effectue une impulsion réfléchiée dans la cavité.)

Actuellement, une seule SCC, construite par Lyncean Technologies, fonctionne dans le monde (depuis 2008). Elle utilise un anneau de stockage. La brillance de cette source est de l'ordre de $\sim 10^8$ ph/s/mm²/mrad²/0,1%bw, et $\sim 10^{10}$ ph/s sont produits à une énergie maximum d'une trentaine de keV [3]. Plusieurs sources Compton d'intensité, de brillance et d'énergie de rayons X plus élevées sont en projet dans le monde [4]. Les paquets d'électrons de 0,1-1 nC à un taux de répétition de quelques dizaines de MHz exigés pour produire des flux supérieurs à 10^{12} ph/s ne sont pour l'instant disponibles qu'avec des anneaux de stockage. Parmi ces projets, ThomX [5] est le plus avancé et vise à produire un flux de $\sim 10^{12}$ – 10^{13} ph/s, avec une brillance de $\sim 10^{11}$ – 10^{12} ph/s/mm²/mrad²/0,1%bw.

5. La machine ThomX.

Angle de croisement avec le faisceau lumineux (θ_c)	2 degrés
Fréquence de répétition (f_{rep})	17,8 MHz
Fréquence d'injection	50 Hz
Énergie des électrons (E_e)	50 à 70 MeV
Charge du paquet d'électrons	1 nC
Émittance normalisée au point d'interaction (IP)	4 mm.mrad
Dispersion relative en énergie ($\Delta E_e/E_e$)	0,3 %
Dimensions transverses du paquet d'électrons à l'IP	70 μ m
Longueur du paquet d'électrons	15 ps

Tableau 1. Paramètres de l'anneau ThomX.

La machine ThomX

La source et le stockage des électrons

Pour ThomX (fig. 5), des électrons d'une énergie de quelques eV sont d'abord photo-émis par l'impact d'une impulsion laser sur une cathode ; puis ils se propagent dans un accélérateur linéaire qui porte leur énergie à 50-70 MeV. Une ligne de transfert adapte le faisceau d'électrons pour les stocker dans un petit anneau de 18 m de circonférence. Afin de maximiser le flux de rayons X, la charge du paquet est portée à 1 nC ($6,2 \cdot 10^9$ électrons) en faisant varier l'énergie laser, et sa taille transverse est réduite au niveau du point d'interaction (tableau 1). À chaque tour d'anneau, l'aire transverse et la longueur du paquet d'électrons augmentent par suite d'un échauffement, dû aux collisions Compton, et de la diffusion coulombienne multiple au sein du paquet. Des systèmes de contre-réaction très rapides sont prévus pour lutter contre les instabilités (d'énergie, de longueur et d'émittance du paquet) causées par des perturbations électromagnétiques dans l'anneau et pouvant conduire à la perte du paquet. Par exemple, la position du faisceau est mesurée à chaque tour et corrigée. Au bout de 20 ms, la structure du paquet est néanmoins dégradée. Il est alors éjecté vers un blindage qui l'absorbe, et est remplacé par un nouveau paquet.

La source de photons laser et leur stockage dans une cavité optique

Le système optique de ThomX est schématisé sur la figure 6. Pour obtenir des

6. Vue schématique du système optique de ThomX comprenant l'oscillateur laser, l'amplificateur fibré, la cavité constituée de quatre miroirs (résonateur optique) et le système de stabilisation de fréquence.

>>>

>>>

flux de photons exploitables, il faut amplifier la puissance d'un faisceau laser pulsé [6] et « empiler » ses impulsions. Nous avons choisi d'utiliser un résonateur (aussi nommé « cavité optique »), constitué de deux miroirs plans et de deux miroirs sphériques [7] ayant un facteur de gain $G \sim 10\,000$ [8]. Pour atteindre cette grande valeur de G , la fréquence ν du laser doit être stabilisée avec une précision $\Delta\nu/\nu = c/(\pi\nu GL)$, où $L/2$ est la longueur de la cavité. Pour ThomX, il faudra atteindre $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-12}$. En outre, pour atteindre un flux de rayons X de $\sim 10^{13}$ ph/s, les impulsions laser en amont de la cavité optique doivent être amplifiées avec un système de fibres dopées à l'ytterbium pompées par diodes – développé au CELIA à Bordeaux [7] – qui délivrera une puissance moyenne de 200 W. En positionnant la cavité optique de sorte que le trajet de la lumière croise celui du faisceau d'électrons, nous profiterons de ces deux étages d'amplification pour produire un haut flux de rayons X. Le défi technologique est de faire fonctionner le système optique sans interruption dans l'environnement d'un accélérateur d'électrons [7]. En particulier, nous appliquerons les méthodes de stabilisation de fréquence des oscillateurs laser développés en métrologie en nous assurant que l'accélérateur n'induit aucun bruit de phase ou d'amplitude qui pourrait perturber l'asservissement fréquentiel du faisceau laser. Les paramètres attendus pour le système optique sont présentés dans le tableau 2.

Finesse de la cavité optique	$\sim 30\,000$
Longueur d'onde du rayonnement laser	$1,032\,\mu\text{m}$
Énergie de l'impulsion stockée dans le résonateur	3 à 17 mJ
Puissance moyenne stockée dans le résonateur	500 à 1000 kW
Longueur de l'impulsion stockée dans le résonateur	10 ps
Largeur spectrale de l'impulsion stockée dans le résonateur	$< 2\,\text{nm}$
Dimensions transverses de l'impulsion stockée dans le résonateur à l'IP	$40\,\mu\text{m}$
Puissance moyenne du faisceau laser après amplification	10 à 200 W
Fréquence de répétition des impulsions laser	35,68 MHz

Tableau 2. Paramètres du système optique (laser et résonateur) de ThomX

7. Deux utilisations d'un faisceau Compton.

En haut, un faisceau étendu et conique (couleur rose). En bas, un faisceau fin et quasi monochromatique.

Applications potentielles

Le faisceau de rayons X

Le faisceau de rayons X disponible à la sortie de la cavité Fabry-Perot a une demi-ouverture de 10 mrad.

Dans une première configuration qui exploite la divergence intrinsèque de l'effet Compton (cf. équation (1)), un large faisceau conique est disponible (haut de la figure 7). Un tel faisceau a une largeur spectrale de quelques pourcents à plusieurs dizaines de pourcents selon l'angle solide sélectionné.

Dans une seconde configuration, seule la partie centrale du faisceau est sélectionnée et focalisée par un dispositif, tel un trans-focateur [9], situé le plus près possible du point d'interaction (IP) avant que le faisceau ne diverge trop. Ce faisceau étroit

8. Dépendance en angle et en énergie du flux spectral (code de couleurs) attendu pour ThomX. Simulation réalisée avec les paramètres des tableaux 1 et 2.

(schématisé en bas de la figure 7), quasi-monochromatique, peut ensuite être envoyé dans un dispositif optique supplémentaire (miroir, monochromateur...) avant d'éclairer un échantillon.

Selon les applications, le grand faisceau conique ou, au contraire, le faisceau étroit et quasi monochromatique sera le plus approprié.

Caractérisation et expériences

La caractérisation du faisceau consistera à mesurer son intensité, sa gamme d'énergie, sa distribution spectrale et angulaire, et son degré de cohérence transverse^(a). Les flux spectraux seront déterminés à partir du faisceau divergent en mesurant, en un grand nombre de petits angles solides du spectre d'émission, l'énergie moyenne et le flux. Ces mesures permettront de reconstruire le flux dans l'espace énergie-angle d'émission, dont la simulation réalisée avec les paramètres des tableaux 1 et 2 est présentée sur la figure 8. Le degré de cohérence transverse sera déterminé à partir d'expériences à doubles fentes d'Young [10], dans lesquelles l'intensité des rayons X sera enregistrée en fonction de leur direction d'émission.

Les diverses caractéristiques du faisceau de ThomX dans les deux configurations de la figure 7 (divergent ou focalisé), ainsi que les principales applications correspondantes, sont présentées dans le tableau 3.

Les caractéristiques du faisceau focalisé du tableau 3, bien qu'inférieures à celles des synchrotrons, seront suffisantes pour mener à bien toute une série d'expériences dans le domaine de la science des matériaux [5] et dans celui de l'héritage culturel [11], en particulier. Le faisceau Compton conique (divergent) permettra, lui, d'illuminer un échantillon de plusieurs cm² sans avoir à le déplacer ce qui, en imagerie et en thérapie, présente un grand avantage sur d'autres sources pour lesquelles il est nécessaire de scanner l'échantillon en le déplaçant (dans les études cliniques réalisées à l'ESRF par exemple, le patient ou l'échantillon doit être déplacé verticalement car la taille verticale du faisceau est d'environ 2 mm). Les flux angulaires et spectraux (voir le tableau 3) permettront de faire toute une série d'études réalisables actuellement uniquement auprès des sources synchrotron. Par exemple, la dose typique délivrée pour une imagerie conventionnelle crânienne sur la ligne biomédicale de l'ESRF (ID17) est de 2,4 Gy/s/cm², à comparer à 2,0 Gy/s/cm² attendu avec le faisceau de ThomX [5]. Autre exemple : pour la radiothérapie, les 2 10¹² ph/s délivrés par ThomX dans un disque de 5 cm de diamètre correspondent à 10⁹ ph/s/mm², du même ordre de grandeur que l'intensité moyenne utilisée dans les essais cliniques de radiothérapie en cours à l'ESRF [12].

Conclusion et planning

La collaboration en charge du projet ThomX est multidisciplinaire. Elle vise à construire un démonstrateur de source X compacte à la pointe de la technologie et à établir ses performances dans le domaine médical, dans l'étude du patrimoine culturel (restauration d'œuvres d'art, contrefaçon, histoire d'une œuvre) et de la science des matériaux, avec des extensions possibles, par exemple dans le domaine de la sécurité (aéroports, douanes...) ou dans l'industrie (identification de défauts de fabrication sans détruire le matériau...).

Les différentes études et simulations sont décrites dans le *Technical Design Report* publié en 2014 [5]. L'intégration de ThomX se fera dans le bâtiment appelé « l'Igloo » sur le campus d'Orsay (voir l'affiche p. 15). Les travaux d'infrastructure du bâtiment, démarrés début 2016, devraient durer un peu moins d'un an. Durant cette période, une intégration partielle sera effectuée (pré-montage et tests des éléments de la machine) en attendant l'intégration finale dans les locaux prévue fin 2016. Après l'installation, la mise en route de ThomX permettra d'obtenir un premier faisceau de rayons X en 2017. ■

(a) La cohérence transverse d'une source est sa capacité à envoyer des ondes spatialement cohérentes en un point donné.

	Énergie (keV)	ΔE/E	D à 10 m	Flux (ph/s)	Applications
Faisceau divergent	~ 90	30%	10 cm	~ 5 10 ¹²	Imagerie <ul style="list-style-type: none"> • Conventionnelle • Contrôle de phase • Grandissement • Renforcement de contours
	45 - 80	2,5%	2 - 3 cm	~ 3 10 ¹¹	
	45 - 90	3%	2,5 - 3,5 cm	~ 4 10 ¹²	
	45 - 90	3 - 10%	2 - 7 cm	4 10 ¹¹ - 2 10 ¹²	
Faisceau focalisé	85	10%	5 cm	~ 2 10 ¹²	Thérapie <ul style="list-style-type: none"> • Radiothérapie/Dosimétrie • Tests d'éléments de Z élevé • Traitement par activation
	> 80				
	80	0,5%	1 cm	7 10 ¹⁰	
Faisceau focalisé	45 - 90	~ 0,1 - 1%	50 μm-1 mm	~ 10 ⁹	Science des matériaux <ul style="list-style-type: none"> • Fluorescence • Diffraction • Spectroscopie XANES

Tableau 3. Principales caractéristiques et applications des faisceaux X issus de ThomX. ΔE/E est la dispersion relative en énergie, D le diamètre du faisceau à 10 m du point d'interaction (IP). Les flux indiqués ont été calculés au niveau de l'échantillon sur la base d'un flux total (avant sélection optique) de 10¹³ ph/s.

Références

- 1• M.E. Couprie et al., *Reflète de la Physique*, **34-35** (2013) 18-23.
- 2• A. Arnold et al., *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **14** (2011) 024801.
- 3• M. Bech et al., *J. Sync. Rad.* **16** (2009) 43.
- 4• M. Jacquet, *Nucl. Instrum. Methods B* **331** (2014) 1.
- 5• A. Variola et al., *ThomX Technical Design Report* (2014) < in2p3-00971281 >.
- 6• L. Casano et al., *Laser and Unconv. Opt. Jour.* **55** (1975) 3.
- 7• J. Bonis et al., *JINST* **7** (2012) P01017.
- 8• A. Borzsonyi et al., *Appl. Opt.* **52** (2013) 8376.
- 9• A. Snigirev et al., *Nature* **334** (1996) 49.
- 10• D. Paterson et al., *Opt. Com.* **195** (2009) 79.
- 11• P. Walter et al., *C.R. Physique* **10** (2009) 676.
- 12• M. Jacquet et al., *Phys. Med.* **31** (2015) 596.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des personnes engagées sur ThomX, ingénieurs, chercheurs, techniciens et administratifs, et veulent souligner les contributions d'Alessandro Variola (initiateur du projet) et de Jacques Haissinski pour son soutien sans faille. Ce travail bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir (référence ANR-10-EQPX-51), de la région Île-de-France et du CNRS.