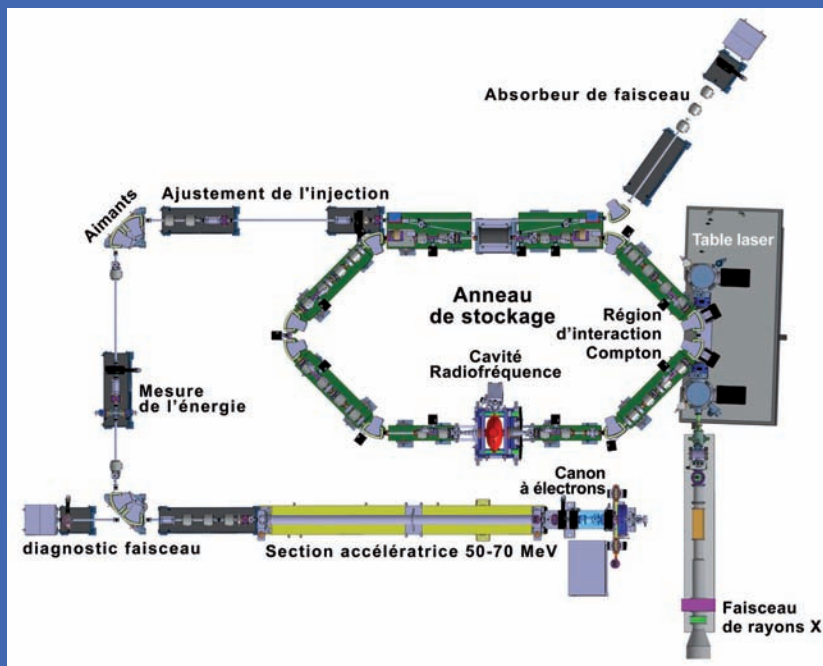


thomX

Une source compacte de rayons X

Depuis leur découverte, il y a un peu plus d'un siècle, les rayons X ont trouvé des applications nombreuses et variées, que ce soit dans le domaine médical, de la physique des matériaux ou encore de l'histoire de l'art. Cependant, les centres de rayonnement synchrotron sont des installations de grande envergure où la compétition entre le grand nombre d'utilisateurs limite le temps disponible pour chacun. L'objectif de ThomX est d'amener des sources de rayons X intenses dans les laboratoires afin de réduire le temps de transit des échantillons et d'accroître le temps d'accès pour les utilisateurs.



Des rayons X très purs

Dans une source telle que ThomX, la collision entre un électron et un photon issus d'un laser, produit des rayons X par effet Compton. Cela permet de produire du rayonnement X pulsé avec un flux relativement élevé dans une source de taille beaucoup plus petite qu'un centre de rayonnement synchrotron. Les propriétés du rayonnement produit par cette rétrodiffusion Compton permettent d'obtenir un rayonnement pur. Bien que l'intensité de ce rayonnement soit plus faible que pour les centres synchrotron, le coût et les dimensions de ce type de machine les rendent attractives pour de nombreuses applications. Ainsi, la machine ThomX occupe une surface d'environ 100 m² seulement et plus de 25 000 m² pour un synchrotron.

Le schéma montre une vue globale de la machine. Les électrons sont produits par un canon à électrons (en bleu en bas à droite de l'image) puis accélérés dans une cavité radiofréquence (représentée en jaune). Au moyen de champs magnétiques, les électrons sont transportés et injectés dans l'anneau (structure hexagonale). Ils sont ainsi stockés pour interagir avec le laser (à la droite de l'anneau). Après 400 000 tours, les électrons sont absorbés et l'on procède à une nouvelle injection.



Analyse de peinture. La Joconde, de Léonard de Vinci (1452-1519).

L'intérêt scientifique des sources de photons produites par rétrodiffusion Compton

L'imagerie dite à contraste de phase est particulièrement adaptée à ce type de source de lumière car elle permet d'obtenir une bonne définition de l'échantillon étudié, avec des flux similaires à ceux de ThomX, en analysant les modifications de l'onde lumineuse transmise à travers l'objet. D'autres applications sont aussi possibles, par exemple, la mammographie 3D sans compression pour dépister les cancers du sein, la bronchographie, l'angiographie d'artères coronaires, la radiographie de seuil K et la thérapie de certains cancers.

La possibilité de régler la longueur d'onde (l'énergie) spécifique des photons (monochromatiques) en variant l'énergie du faisceau d'électrons ou la longueur d'onde du laser est particulièrement intéressante. Cela permet, par exemple de déclencher une réaction résonante par l'interaction entre les rayons X à une longueur d'onde fixée et le nuage électronique d'un produit de contraste (comme le gadolinium ou le platine). Dans le domaine médical, les sources X Compton pourraient donc jouer un grand rôle dans l'imagerie et la thérapie des cancers basées sur de tels agents contrastés. L'importance du rayonnement monochromatique dans les interactions dites « de seuil K » où l'on fait « résonner » des atomes à une énergie donnée dans les tissus moléculaires biologiques est décrite dans plusieurs publications scientifiques, où les applications d'imagerie et de thérapie sont illustrées.

L'analyse d'éléments chimiques est un autre champ d'intérêt important. La demande potentielle la plus prometteuse concerne l'étude du patrimoine historique et les domaines associés. Des rayons X durs (énergétiques) accordables et monochromatiques peuvent être obtenus avec des sources Compton combinées avec l'utilisation de diaphragmes ou de monochromateurs permettant de ne sélectionner que les gammas sur une petite gamme d'énergie. Des travaux récents montrent que de telles sources de radiations pourront être utilisées avantageusement par les techniques de diffraction, d'étude des couches et d'analyse de composants chimiques utilisées pour étudier la peinture des œuvres d'art. Grâce à ces sources, des techniques telles que l'analyse d'éléments lourds, la diffraction et la diffusion radiographique, la tomographie et l'imagerie de contraste de phase deviendront possible et permettront un élargissement important de la gamme d'applications pour l'analyse de chefs-d'œuvre.

Ces études pourront être complétées avec d'autres techniques plus classiques utilisant des sources d'ions, comme la diffusion élastique, l'utilisation de réactions nucléaires pour la détection d'éléments légers et les techniques de rayons X durs. Ainsi, en combinant des techniques de mesure d'ions et de photons sur le même objet, une analyse complète deviendra possible. Ces techniques fournissent des informations précieuses pour la datation d'œuvres d'art. La détection de carbone peut montrer le croquis original d'un dessin, révélant ainsi les modifications pendant sa réalisation. L'analyse non-destructive de peintures permet aussi de révéler des dessins sous-jacents. Une synergie importante peut être développée dans des laboratoires où des physiciens, des chimistes, des restaurateurs et des historiens d'art collaborent dans la même structure. Ici la compacité de la source Compton joue un rôle fondamental car elle permet de placer une telle source à l'intérieur même du musée, donnant la possibilité d'une étude directe des chefs-d'œuvre qu'il héberge. A contrario, l'utilisation d'un laboratoire externe demanderait une logistique complexe avec des coûts importants en termes d'assurance, de sécurité et de transport.



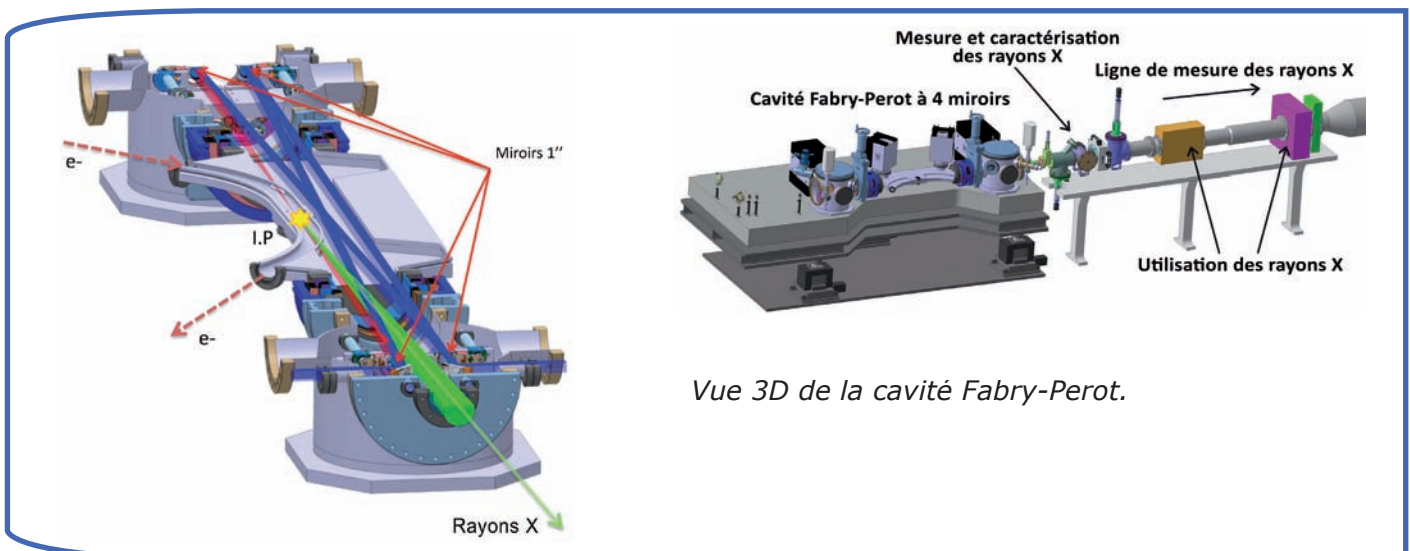
Reconstruction en 3D d'un insecte piégé dans des morceaux d'ambre, il y a 100 millions d'années, et révélé par tomographie X sur le synchrotron européen, ESRF à Grenoble. Microscopy & Microanalysis, 14, 2008, 251-259.

Le projet

Pour toutes ces applications, les caractéristiques des rayons X demandées sont différentes. Les flux nécessaires varient de un million à dix mille milliards de photons par seconde. Le maximum d'énergie de ces photons Compton va de la dizaine de keV, jusqu'à une centaine de keV pour les besoins médicaux. L'attrait principal des sources Compton compactes est de fournir une grande variété de rayons X, à partir d'une machine qu'un laboratoire universitaire, un hôpital, ou un musée peut facilement héberger dans ses locaux. Son prix est par conséquent bien inférieur à celui d'une source synchrotron de grande taille, de type SOLEIL ou ESRF.

Un groupe de laboratoires et d'industriels français s'est formé pour évaluer la faisabilité d'une telle source et la construire. Le projet, ThomX, est le résultat naturel des avancées technologiques importantes sur les résonateurs optiques Fabry-Perot et les lasers à fibre obtenus dans ces laboratoires. Il profite également de leur grande expérience au niveau de la conception et de la mise en service d'accélérateurs et d'anneaux de stockage. Cela a permis de proposer une machine prototype aux performances de haut niveau. Cette machine utilise un photo-injecteur pour produire des paquets d'électrons de 1 nC, puissance particulièrement adaptée à l'imagerie médicale. Ce photo-injecteur est suivi d'une section accélératrice rectiligne à 3 GHz (« linac »), pouvant accélérer ces paquets jusqu'à une énergie de 70 MeV. Ces paquets d'électrons sont ensuite injectés et stockés sans accumulation dans un anneau compact de 17 m de circonférence. En parallèle, une impulsion laser de 25 mJ environ est accumulée dans une cavité Fabry-Perot de grande finesse, continuellement alimentée par un laser à fibre. Le point de collision entre l'impulsion laser et le paquet d'électrons se situe entre deux dipôles de l'anneau. Au moyen d'une synchronisation adéquate, les deux paquets se rencontrent frontalement à chaque tour, plusieurs millions de fois par seconde (fréquence de $\sim 17,8$ MHz), produisant ainsi un flux élevé de rayons X par rétrodiffusion Compton. Les paquets d'électrons de faible énergie sont très sensibles à de nombreuses perturbations, notamment les champs de sillage, le rayonnement synchrotron cohérent ainsi que les effets de recul dus aux collisions avec les photons de l'impulsion laser. Afin de préserver le flux de rayons X malgré ces effets, la durée de stockage des électrons est limitée à 20 ms. Le cycle d'injection du linac est donc de 50 Hz. En parallèle, un programme R&D déjà financé (« MightyLaser ») a pour but d'associer un laser à fibre de puissance moyenne très élevée avec une cavité optique de grande finesse. Cela permettra de stocker dans une cavité optique une très grande puissance allant de 70 à 700 kW. Un système similaire à plus haute énergie est déjà installé sur l'anneau ATF (KEK à Tsukuba au Japon), où il a obtenu des résultats prometteurs en étant un modèle de source de rayons gamma.

Il est important de souligner que les sources X Compton sont complémentaires des sources de lumière synchrotron de troisième génération avec lesquelles elles ne peuvent pas rivaliser en termes de flux émis intégré et de brillance. Une source Compton optimale se situe entre la première et la deuxième génération de sources synchrotrons, mais avec des caractéristiques plus attractives (flux, divergence, monochromaticité, adaptabilité) que d'autres sources X comme, par exemple, les tubes à rayons X, ces derniers peuvent émettre sur de larges spectres et avec des intensités différentes. ThomX est ainsi une source intermédiaire en terme de compacité et de qualité de source. Le prototype ThomX permettra de valider les contraintes et demandes des utilisateurs de ce type de rayonnement tout en acquérant une expérience importante au niveau du fonctionnement d'un anneau de faible énergie et d'une cavité Fabry-Perot de haute finesse.



Vue 3D de la cavité Fabry-Perot.

Compétences clef

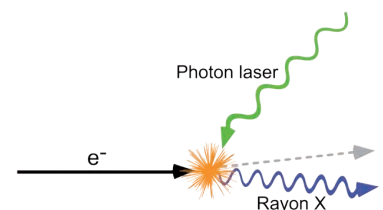
ThomX sera une machine à la pointe de la recherche. Sa réalisation ne sera possible que grâce à des progrès technologiques récents réalisés par des laboratoires Français.

Cavités Fabry-Perot de haute finesse, lasers à fibre, miroirs de haute qualité : La probabilité qu'un photon du laser interagisse avec un électron est très faible. Les photons sont donc accumulés et recyclés en rebondissant sur des **miroirs de très haute qualité**. C'est ce qu'on appelle une cavité Fabry-Perot. Cependant, si la qualité du faisceau laser injecté dans la cavité n'est pas bonne, les photons ne vont pas rebondir correctement et ils ne vont pas rester dans la cavité. Le laser utilisé doit être de très bonne qualité. C'est pour cela que ThomX utilise un **laser à fibre**. Enfin, pour que les photons s'empilent bien les uns sur les autres à chaque tour dans la cavité, il faut contrôler la longueur de celle-ci (c'est-à-dire la distance entre les miroirs) avec une précision meilleure qu'un centième du diamètre d'un cheveu. Cette technique a récemment été validée expérimentalement par des membres de ThomX.

- **Cavités Fabry-Perot :** le Laboratoire de l'accélérateur Linéaire (LAL) a plus de 10 ans d'expérience dans la mise au point de ces cavités qui stockent des photons pendant des milliers de rebonds entre des miroirs de très haute qualité.
- **Miroirs de très haute qualité :** le Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA) à Lyon dispose d'installations parmi les meilleures au monde pour produire ces miroirs destinés à la recherche scientifique.
- **Lasers à fibre de haute puissance :** le CELIA à Bordeaux est l'un des leaders mondiaux dans le développement de lasers où l'élément amplificateur est une fibre optique dopée.
- **Photo-injecteurs :** le LAL a plus de 15 ans d'expérience dans la mise au point de photoinjecteurs. La qualité du faisceau de rayons X dépend de la qualité du faisceau laser et du faisceau d'électrons. Un photoinjecteur permet de produire des faisceaux d'électrons de très haute qualité. Pour cela un laser « arrache » des électrons à une cathode dans un champ électrique alternatif très intense.
- **Dynamique faisceau :** le synchrotron SOLEIL apporte à ThomX son expertise dans l'étude, la construction et le fonctionnement de ses anneaux. De nombreux phénomènes compliqués se produisent au sein d'un accélérateur de particules, surtout dans le cas d'un anneau de stockage. La conception d'un tel anneau requiert une bonne compréhension de ces phénomènes.
- **Ligne X :** l'Institut Néel est l'un des experts mondiaux dans la conception de lignes de mesure des rayons X.
- **Applications médicales :** l'ESRF et l'INSERM sont les pionniers de l'utilisation de rayons X dans la gamme d'énergie de ThomX (beaucoup plus énergétiques que des rayons X classiques) dans le domaine médical.

Une fois le premier prototype construit, sa configuration et les technologies utilisées seront passées en revue pour faire de ThomX un produit industriel commercialisable.

Dans ThomX l'énergie des électrons est 50 millions de fois plus grande que celle des électrons. Lors d'une interaction Compton dans la cavité, un électron «tape» sur un photon et lui transfère une toute petite partie de son énergie. L'électron est très légèrement dévié, par contre l'énergie du photon est augmentée d'un facteur vingt mille, en moyenne. L'énergie des photons après la collision correspond à la gamme des rayons X.



Principe de l'interaction Compton.

Contact :

UMR8607 - Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire - Centre Scientifique d'Orsay
Bâtiment 200 - BP 34 - 91898 ORSAY Cédex
commthomx@thomx.fr - <http://www.thomx.fr>



ThomX est le projet n° ANR-10-EQPX-51 des Equipex 2010.