

Résumé de la réunion détecteurs de rayons X pour sources de hautes brillance du jeudi 2 octobre 2008 au LAL

Auteurs : Abdenour LOUNIS (LAL), Jean François Berar (Inst. Neel, CRG/ESRF)

Projet XFEL :

Le laser XFEL se présentera comme un imposant tunnel de 3,4 kilomètres de long. Il s'étendra de l'anneau de synchrotron Desy, à Hambourg, jusqu'à la ville voisine de Schenefeld, dans le Land de Schleswig-Holstein. Il doit commencer à sortir de terre en 2008. La mise en service est prévue en 2013. Coût total de la construction : 986 millions d'euros, supportés à 60% par l'Allemagne, en collaboration avec d'autres partenaires dont la France (50 millions d'euros) et la Russie.

Le laser XFEL est essentiellement destiné à la recherche fondamentale. L'installation permettra aux chercheurs d'explorer l'intimité de la matière. Opérant à l'échelle du milliardième de mètre, XFEL promet ainsi nombre d'applications nouvelles au niveau des atomes et des molécules, telles que "filmer" les réactions chimiques, décoder les détails atomiques des molécules ou encore réaliser des clichés en trois dimensions dans le "nanocosmos". Son mode de fonctionnement ? Des électrons portés à des niveaux d'énergie considérables (entre 10 et 20 milliards d'électronvolts) slaloment à l'intérieur d'un dispositif magnétique (onduleur) dans lequel ils émettent des rayons X ultrabrillants et ultrabrefs ayant toutes les propriétés d'un faisceau laser. D'où le nom de "laser à électrons libres source de rayons X" (en anglais XFEL pour X-ray Free-Electron Laser).

Résumé de la réunion sur les détecteurs auprès de sources de haute brillance :

1 Introduction :

En introduction Dominique Chandesris a donné des informations sur le projet XFEL. La communauté Française est encore peu mobilisée sur les potentialités de recherche de ce projet et a très peu participé aux workshops organisés par X FEL. Le CNRS a organisé un workshop le 2 juin 2008 dont l'objectif était principalement d'informer sur ce projet : faire le point sur les performances du X-FEL et identifier des thèmes de recherche où des percées notables sont attendues. La réunion a été un succès. 150 personnes sont venues et ont donc pris connaissance de ce que sera X-FEL grâce à l'exposé très complet de Massimo Altarelli. Les autres exposés ont, dans l'ensemble, fait un point très actuel des résultats récents du domaine scientifique présenté, et à des niveaux divers, présenté les perspectives ouvertes par le X-FEL.

La question posée aujourd'hui est quelle suite donner à cette réunion. En fin de réunion, il y a eu unanimité pour dire que les communautés prépareraient leur utilisation efficace de X FEL en utilisant dès aujourd'hui les autres sources existantes : toutes les sources basées sur l'utilisation de lasers et rayonnement synchrotron 3eme génération, en mettant l'accent sur les dynamiques rapides et la cohérence.

Plusieurs structures de réflexion-travail collectif (GDR, plateformes....) existent déjà et peuvent être des lieux d'échange ou de gestation de nouveaux projets. C'est le cas pour des thématiques telles que les lasers, les sources UV, les plasmas. La communauté du magnétisme est structurée (colloque Louis Néel, école Mittlewih), la diffraction X ultra rapide et les effets photoinduits sont abordés au sein d'un GDR. Pour l'imagerie et la dynamique par diffusion X cohérente, la constitution d'un groupe de travail est proposée (Initiative Marseille, Grenoble, SOLEIL).

Les développements en instrumentation seront axés sur les aspects optiques et détecteurs. Il s'agira de faire des efforts dans le sens de l'organisation des activités Françaises autour de XFEL, de définir les rôles de chacun et de lancer des

collaborations au niveau Européen. Une marge de développement est possible dans le domaine de la détection en s'appuyant sur le travail actuel réalisé pour les expériences en rayonnement synchrotron (CRG ESRF et SOLEIL). Les programmes de recherches autour de XFEL permettent des applications pluridisciplinaires et peuvent offrir une large palette d'innovations dans des domaines scientifiques annexes.

Guy Wormser a commenté l'apport du LAL au développement du projet XFEL qui devra fournir 800 coupleurs. Le budget total s'élève à 40 M€ dont la moitié servira à la construction des cryo-modules à l'IRFU. Pour plus de détails, lire :

<http://mecanique.lal.in2p3.fr/coupleurs-XFEL/index.htm>

http://lcdev.kek.jp/ILCWS/Talks/13wg1-1-ILC_XFEL_brinkmann_1104.pdf

La France a une responsabilité clé dans la construction du LINAC. GW est membre du conseil scientifique de DESY, ce qui est un atout pour faire remonter les informations, demandes de notre communauté au niveau du management général.

2/ Projets de développements de détecteurs X et électronique associés

Pierre Delpierre a décrit les projets de développement de pixels hybrides au niveau européen notamment dans le cadre du projet XFEL et du programme FP7 : HIZPAD et Network DINERS.

Pour XFEL, ont été montrées, les caractéristiques et contraintes imposées par la structure temporelle du faisceau de 3000 paquets de 10^{12} photons par train (100 ms) espacés de 200 ns chacun. La liste des projets de développements de détecteurs acceptés et ceux retenus par le comité XDAC ont été énumérés. Ceux qui ont été acceptés sont les pixels hybrides formés de pixels de $200 \times 500 \mu\text{m}$ HPAD, avec un pipeline analogique avec une capacité de stockage de 400 à 1000 images, les DEPFET structures monolithique de $200 \mu\text{m}^2$ à bas bruit performants pour les X mous et dotés de convertisseurs analogique digital en technologie CMOS 130 nm et architecturés en étages avec des liaisons puce-flexible via le capteur silicium et enfin un détecteur basé sur des pixels de grandes dimensions et de meilleure tenue aux irradiations. Les possibilités offertes au CNRS et à l'IN2P3 de participer aux développements de détecteurs de pixels hybrides peuvent se faire dans le cadre du programme HIZPAD qui regroupe une communauté de chercheurs en Europe autour des divers synchrotrons européens. Un organigramme du réseau Européen (DINERS) a été montré. Il est mis en place pour structurer cette activité et développer des détecteurs pour les sources à hautes brillances en Europe.

Jean Claude Clemens a présenté les pixels hybrides pour rayons X, XPAD développés dans le laboratoire du CPPM de Marseille. Ces développements ont démarré, il y a une dizaine d'années et ont donné lieu aux versions XPAD 1 et 2 en technologie AMS 0,8 microns avec des pixels issus du projet DELPHI au CERN. Les contraintes à satisfaire sont d'une part une sensibilité aux photons de 5 à 25KeV, avec un taux de 10 millions de photons par mm^2 par seconde avec une dynamique de comptage « infinie ». Une carte d'acquisition a été développée pour connecter 8 détecteurs de 8 cm^2 chacun soit 38000 pixels sur 64 cm^2 . Les temps d'acquisition

minimales par images est de 2 ms, avec une mémoire locale pouvant stocker 223 images de 32 bits.

Une nouvelle version XPAD 3 en technologie 130 nm a été développée en partenariat avec l'institut Louis Neel, Soleil avec des pixels plus petits (130microns) et la possibilité de disposer de 9600 pixels par puce. Les détecteurs de 67200 pixels ont été réalisés. Les taux d'acquisitions ont été améliorés à 1000 images/s.

Les matériaux à Z élevés avec du CdTe ont été exploités. Malgré certains inconvénients liés à la fragilité et la collecte des trous, Ils montrent néanmoins une bonne efficacité pour des énergies au-delà de 20 KeV et possèdent une bonne résistance aux irradiations. Parmi les perspectives et améliorations de ce projet, une version avec collecte d'électrons est prévue avec une capacité de détection dans des conditions de faisceaux dotés de paquets très proches en temps. Enfin une extension aux technologies d'intégration verticale est prévue avec une recherche de partenaires industriels plus diversifiés.

Christophe de la Taille a présenté les ressources en microélectronique à l'IN2P3 et a donné un aperçu des différentes réalisations des circuits VLSI conçus dans nos laboratoires. Le pôle de microélectronique d'Orsay a été présenté avec les expertises en technologies 0,35 μm . Bon nombre de circuits intégrés à la pointe de la technologie ont été développés pour répondre aux besoins des expériences de physique des particules en Europe et dans le monde. Une avancée vers les technologies en 3 dimensions miniaturisées et à très bas bruit possédant une meilleure tolérance aux irradiations et dotées de faibles granularités constitue le chantier d'avenir de cette équipe.

Marc Winter a décrit les objectifs scientifiques du programme de recherche sur les détecteurs CMOS qui se destine pour les projets ambitieux post-LHC comme le collisionneur linéaire. Une large palette de débouchés des capteurs CMOS a été énumérée et englobe non seulement la physique subatomique mais aussi les applications d'imagerie médicale. Le principe des capteurs CMOS et leurs avantages fonctionnels ont été détaillés et montrent la sensibilité et la finesse technologique d'un tel développement. Plusieurs partenaires nationaux et internationaux experts dans les hautes technologies ont été associés au laboratoire de Strasbourg où sont conçus ces dispositifs avancés. Les performances des capteurs CMOS allient une excellente résolution spatiale inférieure à 3 microns, une bonne résistance aux irradiations allant jusqu'au MRad et une efficacité nominale indépendante de la température.

Un maximum de fonctionnalités à intégrer sur le capteur CMOS constitue un objectif majeur de cet axe de recherche et développement. Une voie d'avenir est abordée pour tirer le meilleur parti de l'exploitation des nouvelles technologies 3D pour optimiser les capacités des détecteurs et de l'électronique associée. Les critères de performances montrés rendent ce dispositif à priori adéquat pour une utilisation auprès des sources de hautes brillances telles que XFEL.

Eric Delagnes a fait un état des lieux du développement à l'IRFU des détecteurs utilisables pour les rayons X. Les options choisies à l'IRFU sont les détecteurs de senseurs de pixels actifs (MAPS), les matrices de micro bolomètres et enfin les détecteurs gazeux, micro mégas et ses dérivés. Dans la problématique de détection de rayons X, les détecteurs basés sur du CdTe sont destinés à détecter des rayons X de 0,5 à 80 KeV en utilisant la technique de focalisation. Ce sont des matrices de pixels de 64 mm² de surface avec des pas de 625 microns. Leur résolution est de 100 ns en temps et de 1,2 KeV à 60 KeV en énergie. Une micro-caméra X ultra-compacte sensible aux photons compris entre 2 et 250 keV comble un fossé entre

deux domaines, celui des rayons X de basse énergie et les photons gamma. Le premier prototype, dénommé Caliste 64, est équipé d'une matrice de 8x8 pixels indépendants en CdTe et est dotée d'une électronique de lecture des pixels placée perpendiculairement au plan de détection. Cet aspect novateur permet de juxtaposer un grand nombre de matrices élémentaires, sans pratiquement aucune zone morte. En 2008 un module encore plus performant, Caliste 256 doté de 256 pixels et de 625 micromètres de pas, est en cours de construction et d'évaluation. La résolution en énergie prévue sera de 0,85 eV à 60 KeV et sera inférieure à 50 ns en temps pour des énergies de 150 KeV. Le troisième développement exposé concerne les détecteurs à Micro mégas de haute granularité et possédant une excellente tenue aux irradiations. En particulier, une micro TPC utilisant les avantages de la puce de lecture TimePIX a été développée. Un aperçu des excellentes performances de ce nouveau dispositif alliant les avancées des procédés utilisés en microélectronique a été présenté.

3/ Besoins en détection d'applications pluridisciplinaires

3-1/ Besoins en biologie (Jean-Pierre Samama, Dir. Scientifique au Synchrotron Soleil)

Les matériaux biologiques sont fragile et peuvent évoluer sur des échelles allant de la ps à la ms.

Pour connaître leur structure, des expériences de cristallographie sont réalisées : la qualité des données y est essentielle, elle impose une bonne dynamique car l'échantillon se dégrade sous faisceau, l'idéal est l'enregistrement continue pour la qualité des données. La taille du détecteur est importante car elle est nécessaire pour mesurer les faibles raies aux grands angles dans les même conditions que les plus intenses des petits angles. On ne peut pas négliger ces faibles raies qui accroissent la résolution de la structure (0.5Å).

De nombreuses études se font en en solution, elles concernent des volumes de plus en plus petits allant vers le micro litre pour comprendre la fonctionnalité de ces objets, les mécanismes en jeu sont de souvent l'ordre de la ms.

L'horizon XFEL permet d'envisager d'accéder à la structure d'un objet unique acquise lors d'un seul bunch.

3-2/ Perspectives en sciences des matériaux (Silvain Ravy, Resp. Ligne CRISTAL au Synchrotron Soleil)

Les études en sciences des matériaux utilisent surtout des énergies allant de 5 à 30keV. Dans les images de diffractions il est souvent nécessaire de connaître simultanément les pics de Bragg, dont l'intensité est de l'ordre de grandeur de celle du faisceau direct ainsi que les faibles intensités diffusées entre ces pics qui caractérise les « défauts » des cristaux (ces défauts à une périodicité parfaite font les propriétés des matériaux que nous utilisons, cf plasticité/dislocations). Ces intensités sont 10^{-6} voire 10^{-8} fois plus faibles. Le progrès des sources amplifie cette dynamique en concentrant l'intensité des pics de Bragg dans des pixels plus petits.

Depuis 15 ans environ, une nouvelle possibilité d'usage des RX est apparue en utilisant la cohérence des faisceaux brillants. Celle-ci permet de réaliser les figures d'interférences classiques de l'optique classique (fentes, coin...) et de caractériser les objets par reconstructions (forme et contrainte dans des nanoparticules), ces expériences supposent des pixels d'environ 50 nm pour être utilisables à un mètre de l'échantillon, l'éloignement géométrique étant souvent exclu aux angles de la diffraction.

Application pompe-sonde: reconstituer la dynamique des réactions physico-chimiques à l'échelle de la nanoseconde (synchronisation des obturateurs mécaniques (limités vers 1 kHz) et/ou obturateurs électroniques avec le faisceau et le laser pompe...)

Sous XFEL les problèmes de saturation des comptages sont à envisager.

3-3/ Spectroscopie des X durs (Jean-Louis Hazemann, Resp. Ligne FAME/ESRF, Inst. Néel)

Ce domaine est concerné par des photons d'énergie supérieure à 5 keV, elle utilise surtout les photons transmis (échantillon concentré) ou ceux de fluorescence (échantillon dilués). La dynamique est importante et il faut connaître la transmission à mieux que 10^{-4} .

Actuellement les détecteurs ayant les résolutions adéquates utilisent des cristaux de Ge, ils n'ont guère évolué depuis 20 ans et restent très artisanaux. Le « 30 éléments » de FAME est l'un des plus grands existants, sa résolution en énergie est de 10^{-2} . Le progrès de ce détecteur semble être l'usage d'un PentaFET. L'ensemble est une usine à gaz (LN₂) + 30 modules ampli-discrims externes...

Les problèmes expérimentaux proviennent principalement de la saturation par la matrice lors de la mesure d'éléments dilués (problèmes concernant l'environnement, le patrimoine...) Un progrès serait de pouvoir intégrer sur un plus grand angle pour ne pas gaspiller trop de photons en effet les expériences actuelles peuvent atteindre 6 h pour caractériser un seul élément.

Lors d'expérience à très haute résolution en énergie (10^{-4}), la solution expérimentale passe par des cristaux analyseurs et se rapproche des exigences d'une expérience de diffraction.

3-4/ Extension vers les X mous (Paul Morin, Dir. Scientifique au Synchrotron Soleil)

X mous : c'est le domaine inférieur à 1 keV, important pour le seuil K des éléments légers et le seuil L de ceux de transitions, c'est l'accès aux propriétés magnétiques..

C'est un domaine où l'on travaille sous vide!

Ce domaine est concerné par exemple par :

- intérêt matière diluée, nano particule et plasma
- chimie processus élémentaire à la Femto seconde
- En matériaux, photoémission (surface.interface, études résolues en temps), imagerie de domaine magnétique et leur dynamique.
- en biologie, la dynamique des macromolécules met en jeux des énergies du THz

On veut y détecter électrons, ions, photon avec dynamique et résolution temporelle, le besoin d'imagerie y existe aussi.

Pour les détecteurs d'électrons, il faut un **grande dynamique** et comme une impulsion produit un grand nombre d'électrons, il semble que le **mode courant** soit plus favorable que le comptage

Pour l'imagerie par diffusion RX (mous) cohérents, mêmes pbs que les X durs :

- Grande dynamique,
- Grand nombre de pixels (petits), impliquant une grande bande passante (temps de lecture)

Autres exemples :

- dynamique moléculaire : chemins réactionnels multiples à caractériser par détection d'ion, d'électrons avec résolution simultanée spatiale et temporelle.

3-5/ Retombées vers les laboratoires (Jean-Francois Berar, Resp. Ligne D2AM/ESRF, Inst. Néel)

Tous les développements actuel des détecteurs ont été poussés par les demandes non satisfaites auprès de synchrotron comme le projet XPAD. Les détecteurs ainsi développés peuvent diffuser vers les laboratoires où ils offriront des moyens de détection supérieur à ceux dont ils disposent : on voit apparaître un regain d'équipement en détecteur linéaire dans ces laboratoires qui montrent qu'ils sont demandeur d'un progrès. Ces détecteurs doivent pouvoir essaimer, cf. la SpinUp du CPPM.

Des communautés plus éloignées, comme les laboratoires du patrimoine sont aussi demandeuses de progrès dans ces détecteurs (temps d'acquisition, mobilité...)

4- Remarques générales :

- Cette première réunion est une prise de contact entre deux communautés qui ne se connaissent pas forcément. Elle devra être poursuivie par des réunions de travail autour de thèmes bien précis afin d'aboutir, au final, à un cahier des charges techniques pour mieux définir les besoins et les mettre en adéquation avec les savoir faire ou ressources techniques et technologiques disponibles dans les laboratoires de l'IN2P3.

- Un des objectifs serait d'établir des projets de R&D communs à nos instituts autour du projet XFEL ou des synchrotrons et par ce biais de disposer de tous les

ingrédients scientifiques pour soumettre des projets innovants à l'Agence Nationale de la Recherche.

- Dans le cadre du développement de la thématique technologique autour de XFEL ou des synchrotrons, un calendrier des actions à mener, dans le court, moyen et long terme, devra dès à présent être élaboré. Ceci permettra de poursuivre les échanges et les contacts entre les différents instituts pour mettre en place de nouvelles collaborations.

- Une matrice où figurerai les caractéristiques en termes de taux de rayonnements, radio tolérance, taux d'occupations, résolutions temporelles, spatiales et en énergies devra être établie et servira de point de référence aux équipes de l'IN2P3 pour mieux cerner les besoins.