

Een kleurrijke en flitsende röntgenbron

De eerste fotonen van onze nieuw ontwikkelde compacte röntgenbron zijn vorig jaar gemeten. Met de zogenoemde Smart*Light-bron kunnen we de energie van de röntgenfotonen op continue wijze variëren. Dit biedt mogelijkheden voor experimenten die tot nu toe alleen konden worden uitgevoerd bij grootschalige onderzoeksfaciliteiten, zoals synchrotrons en vrije-elektronenlasers.

Smart*Light, de röntgenbron die vorig jaar september zijn eerste fotonen uitzond, is in eerste instantie ontwikkeld aan de Technische Universiteit Eindhoven om kostbare en kwetsbare kunstwerken lokaal te kunnen bestuderen. Maar er is ook interesse in de compacte, heldere en continu verstelbare röntgenbron vanuit andere vakgebieden, zoals de halfgeleiderindustrie en staalproductie. Sinds de ontdekking van röntgenstraling in 1895 door Wilhelm Röntgen is de röntgenbron uitgegroeid tot een hoeksteen van de medische wereld, industrie en wetenschap. Met röntgenstraling kun je meer dan enkel door materialen heen kijken. Ieder element heeft bijvoorbeeld zijn eigen karakteristieke 'röntgenkleur'. Op die manier kun je de chemische samenstelling binnen in het materiaal bepalen. Bovendien is het vanwege de korte golflengte mogelijk om dit met zeer hoge positienuwkeurigheid te doen. Door deze unieke combinatie van eigenschappen zijn röntgenbronnen nu essentieel voor materiaalinspectie, medische beeldvorming en biologisch onderzoek.

Nieuwe techniek

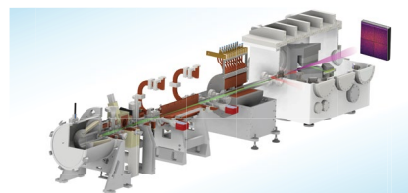
Je kunt röntgenstraling opwekken door geladen deeltjes zeer snel te laten trillen of door ze abrupt te vertragen. De Smart*Light-bron werkt met een nieuwe techniek: deeltjes zeer snel laten trillen door hoog-relativistische elektronenpulsen met intense laserpulsen te laten botsen. Hierdoor vindt

er omgekeerde comptonverstrooiing (Engels: inverse Compton scattering, ICS) plaats, waarbij het elektron zijn energie overdraagt aan een laserfoton, dat daarvoor omgezet wordt in een röntgenfoton (zie hieronder).

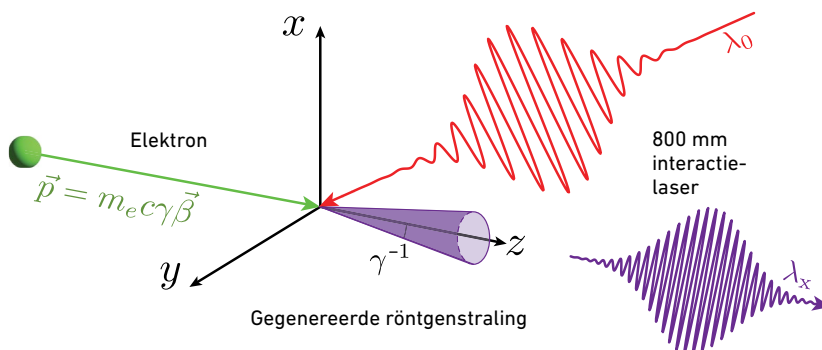
Doordat de energie van de elektronen de energie van de fotonen bepaalt, is de röntgenenergie van een ICS-bron verstelbaar. Dat was tot nu toe niet mogelijk voor röntgenbronnen die in een standaardlab passen. Daarbij is de polarisatie van het röntgenfoton direct te relateren aan de polarisatie van het laserlicht, die eenvoudig en snel aan te passen is. De polarisatie kan bijvoorbeeld gebruikt worden in het bestuderen van magnetische materialen.

Compacte opstelling

De belangrijkste uitdaging van ICS-bronnen is de kleine werkzame

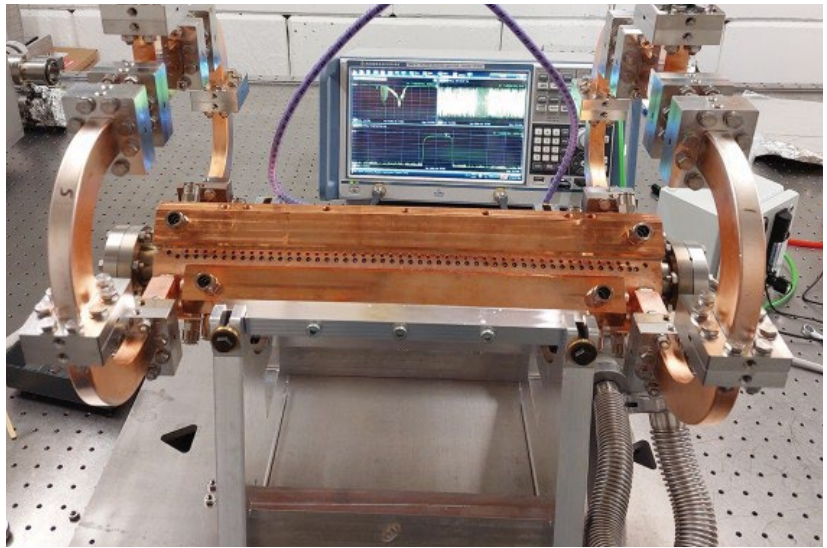


doorsnede van thomsonverstrooiing, die slechts 66 fm² bedraagt. Die bepaalt hoeveel laserfotonen worden omgezet in röntgenfotonen tijdens een botsing tussen de elektronenpuls en de laserpuls. Om een goede opbrengst te krijgen, moeten zowel de elektronen als de laserpulsen een zo hoog mogelijke dichtheid hebben. Dit is voor elkaar te krijgen door ze te focuseren tot een diameter van enkele micrometers. De Smart*Light-opstelling begint met een laser die pulsen opwekt met een duur van 100 fs en een golflengte van 800 nm, dus in het infrarood.



Bij omgekeerde comptonverstrooiing botst een hoog-relativistisch elektron met lorentzfactor γ op een foton met golflengte λ_0 . Daardoor krijgt het golflengte $\lambda_x = 4 \gamma^2 \lambda_0$. Bij $\gamma = 50$ wordt de energie van het inkomende foton dus met een factor 10.000 verhoogd. De fotonen worden vooral uitgezonden in een smalle kegel, met halve openingshoek $1/\gamma$. Dit levert een geconcentreerde röntgenbundel.

Het grootste gedeelte van dit licht gebruiken we om röntgenfotonen op te wekken door middel van ICS, terwijl we een klein gedeelte ervan afsplitsen en omzetten naar ultraviolet. Aan het begin van de bundellijn maakt deze ultraviolette laserpuls, via het foto-elektrisch effect, een kort pulsje elektronen vrij die we injecteren in onze versneller. Gezien de interactielaser- en elektronenpuls van dezelfde lichtpuls uit het lasersysteem afkomen, zit er geen tijdsverschil tussen de twee. Hiermee is de vereiste synchronisatie van elektronen- en laserpulsen gegarandeerd. De versneller staat centraal in de opstelling en maakt de bron uniek (zie hiernaast). Binnen een halve meter versnellen we hiermee de elektronen tot ongeveer 99,98 procent van de lichtsnelheid (lorentzfactor $\gamma = 50$). De technologie om dit te doen is pas heel recent ontwikkeld binnen CERN. De Smart*Light-versneller is in samenwerking met dit gerenommeerde instituut ontworpen. Vooral omdat deze versnellertechnologie zo compact is, kan de volledige lengte van de Smart*Light-elektronenbundellijn binnen drie meter gehouden worden. Nadat de elektronenbundel naar een relativistische energie is versneld, focuseren we de bundel naar een zo klein mogelijk punt. Het helpt hierbij dat relativistische effecten ervoor zorgen dat het pad van de elektronen minder verstoord wordt door de onderlinge coulombkrachten. In een focuspunt van enkele micrometers interacteren de elektronen en de fotonen. De röntgenbundel die hierbij ontstaat beweegt dan nog in dezelfde richting als de elektronen. Een buigmagneet scheidt de twee van elkaar. De elektronenbundel eindigt zijn leven in een afgeschermd bundelstop terwijl de röntgenbundel de vacuümketel verlaat, klaar voor experimentele toepassingen. Wanneer de opstelling op volledig vermogen werkt, botsen 60 miljoen elektronen op een laserpuls van 10 mJ (4×10^{15} fotonen) in een oppervlak met een diameter van 10 μm , wat zo'n 2000 röntgenfotonen oplevert. Dit hele proces herhaalt zich 500 keer per seconde.



Koperen versnelstructuur. Via golfpijpen (links en rechts) gaat microgolffermogen in en uit de versneller met 50 trilholtes die kleine gaten hebben, irissen genaamd, zodat elektronen en microgolffermogen van trilholte naar trilholte kunnen verplaatsen. De trilholtes zijn zo gekozen dat de elektronen en het vermogen gelijktijdig door de gehele versnelstructuur propageren. Zo wordt de elektronenenergie telkens verhoogd.

Geoliede machine

Op 6 september 2024 is het voor het eerst gelukt om röntgenflitsen te maken met de Smart*Light opstelling. Een belangrijke mijlpaal. Alle componenten werkten samen als een geoliede machine. We kunnen het apparaat nu gaan toetsen aan de beloftes. Sindsdien is de röntgenbundel uitgebreid bestudeerd en vergeleken met theorie en simulaties. Zo hebben we gekeken naar het aantal fotonen per puls, de duur van de röntgenflits en de instelbaarheid van de polarisatie. De belangrijkste eigenschap, de continue variabiliteit van de fotonenergie, hebben we kunnen verifiëren samen met onderzoekers van de Universiteit Gent (zie pagina 46 rechtsboven) [1]. Op dit moment is het mogelijk de röntgenenergie continu te variëren tussen de 5 en 18 keV. Op volledig vermogen kan de opstelling uiteindelijk een röntgenenergie van 40 keV bereiken. De eerste metingen aan de röntgenbundel laten zien dat theorie en simulaties nauw overeenkomen met de experimentele resultaten [2]. Vanuit wetenschappelijk oogpunt wellicht een beetje saai en te verwachten, maar vanuit technologisch oogpunt héél belangrijk. Smart*Light doet wat het belooft.

Versterkt contrast

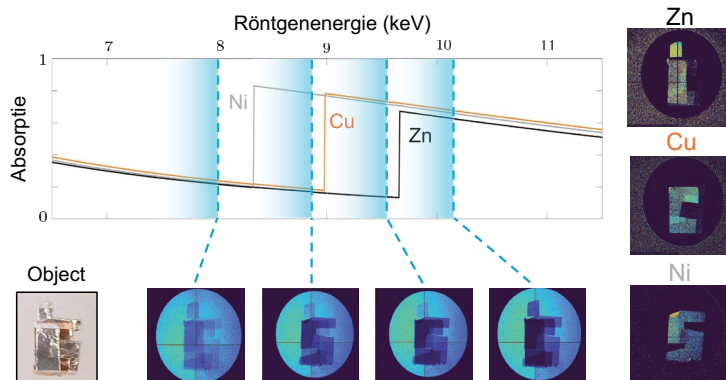
Smart*light onderscheidt zich van röntgenbuizen, de conventionele röntgenbronnen in het lab, door het nauwbandige spectrum, waarvan de centrale golflengte continu gevarieerd kan worden, en de hoge mate van coherentie. Hierdoor worden geavanceerde röntgentechnieken mogelijk die tot nu toe voorbehouden waren aan synchrotrons. Een voorbeeld van een dergelijke geavanceerde techniek is beeldvorming rondom de absorptierand van de K-schil (Engelse term: *K-edge subtraction imaging*, kortweg KES). Normaliter gaat een röntgenfoton steeds makkelijker door een materiaal naarmate de energie hoger wordt. Maar, de absorptie neemt plotseling sterk toe als de energie van de fotonen groot genoeg is om een elektron uit een van de elektronenschillen van het atoom uit te schieten. Dit effect is het sterkst voor röntgenfotonen die elektronen uit de onderste schil, de K-schil, aanslaan. Doordat de energie van de absorptierand uniek is voor ieder materiaal, kun je hier slim gebruik van maken. Door een object twee keer te belichten met verschillende energieën (nét onder de K-schil met weinig absorptie en nét boven de K-schil met veel absorptie) en te kijken naar het

verschil tussen de twee afbeeldingen, is het mogelijk één specifiek materiaal uit het object te isoleren (zie beneden). *K-edge subtraction imaging* biedt interessante mogelijkheden voor medische beeldvorming. Door contrastvloeistof met jodium (K-schil op 33 keV) te gebruiken, kun je bijvoorbeeld aderverkalking, een belangrijke oorzaak van hart- en vaatziekten, in kaart brengen. Ook kan deze methode de beeldvormingstechnieken voor mammografie verbeteren.

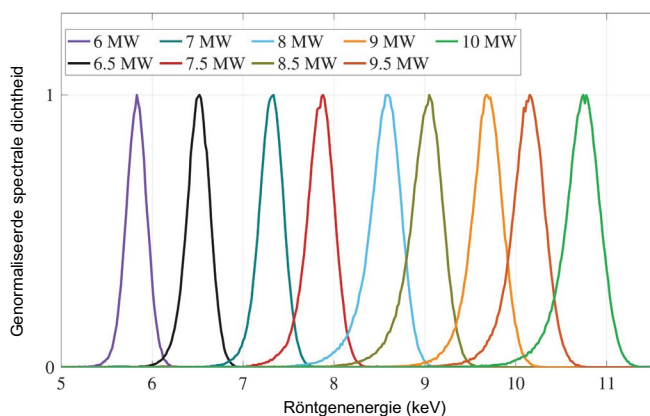
Oude meesters en nieuwe chips

Een interessante toepassing van geavanceerde röntgendiagnostiek vanuit wellicht een onverwachte hoek, is het bestuderen van schilderijen, in het bijzonder oude meesters. Het vervoer van kostbare en kwetsbare kunstwerken naar grote röntgenfaciliteiten stuit echter op grote bezwaren. Dit leidde tot de wens van een compacte en heldere röntgenbron aan een universiteit of zelfs in een museum. Daaruit is het idee voor Smart*Light oorspronkelijk ontstaan. Smart*Light moet het niet alleen mogelijk gaan maken om te achterhalen welke pigmenten voor het schilderij zijn gebruikt, maar ook om verschillende lagen van elkaar te onderscheiden. Wellicht dat onder een van de oude meesters nog een ander schilderij verborgen zit. Naarmate het idee voor de bron zich verder ontwikkelde ontstond steeds meer interesse vanuit andere vakgebieden. Zo is de bron ook voor de halfgeleiderindustrie een interessant

instrument. In de nieuwe generatie chips zijn de kritische, kleinste onderdelen tegenwoordig over meerdere lagen verdeeld. Maar hoe controleer je of binnen in de chip alles goed gefabriceerd is tot op de nanometerschaal? Dit is alleen maar mogelijk met een zeer coherente en nauwbandige röntgenbron. Nauwkeurige kwaliteitscontrole is uiteraard niet alleen van belang voor de halfgeleiderindustrie, maar is bijvoorbeeld ook interessant voor staalproductie. Tot slot biedt Smart*Light de mogelijkheid om ultrasnelle processen in objecten te onderzoeken door middel van *pump-probe*-metingen. Hierbij maak je gebruik van het feit dat de röntgenstraling aankomt in picosecondenflitsen, die perfect gesynchroniseerd zijn met femtosecondelaserpulsen. Een voorbeeld van een dergelijk experiment is het bestuderen van snel schakelende magnetische materialen, waarbij ook de instelbare röntgenpolarisatie een essentiële rol speelt.



Voorbeeld van *K-edge subtraction imaging* met de Smart*Light. Een object van drie materialen, nikkel, koper en zink, is doorgelicht met vier röntgenenergieën. Op beelden van een enkele energie zijn de structuren niet duidelijk onderscheidbaar. Door de verschillende beelden van elkaar af te trekken springen de letters I-C-S eruit.



Spectrum van de röntgenbundel voor verschillende microgridvermogens. Verandering van dat vermogen verandert de energie van de elektronen en dus de gemiddelde foton-energie van de röntgenbundel.

Alle bovenstaande toepassingen zijn al mogelijk bij grootschalige röntgenfaciliteiten. Helaas zijn deze beperkt toegankelijk voor wetenschappers. Dit geldt uiteraard in nog veel sterkere mate voor patiënten en industrie. We voeren nu demonstratie-experimenten uit, waarmee we laten zien dat de geavanceerde röntgentechnieken ook met Smart*Light mogelijk zijn. Voor serieuze toepassingen moet de röntgenflux van de Smart*Light-bron met twee tot drie orden van grootte verhoogd worden. Hier wordt nu hard aan gewerkt. Ons uiteindelijke doel is verspreiding van de Smart*Light-technologie onder universiteiten, bedrijven, ziekenhuizen en musea. Zo hoef je niet meer op reis, je loopt enkel naar een andere kamer in het gebouw.

Ids van Elk en Coen Sweers zijn promovendi bij de vakgroep Coherence and Quantum Technology van de TU Eindhoven.

Peter Mutsaers is universitair docent bij de vakgroep Coherence and Quantum Technology van de TU Eindhoven en hoofdonderzoeker bij het Smart*Light-project.

Jom Luiten is hoogleraar bij de vakgroep Coherence and Quantum Technology van de TU Eindhoven en hoofdonderzoeker bij het Smart*Light-project.

REFERENTIES

1. www.ugent.be/we/ugct/en/ugct/groups/rp
2. Van Elk, I., Sweers, C., Nijhof, D., van den Berg, R., Lucas, T., Stragier, X., Tack, P., Boone, M., Luiten, O., & Mutsaers, P., X-rays from a Compact and Tunable LINAC-based Compton Scattering Source, *Opt. Express* 33, 47498-47513 (2025).