

# Het temmen

## Intense en ultrasnelle lichtpuls



Stefan Witte (1979) heeft als FOM-oio promotie-onderzoek gedaan in de vakgroep Atoom- en Laserfysica aan de Vrije Universiteit. Hier werkte hij aan ultrasnelle lasers en precisiespectroscopie, onder begeleiding van Kjeld Eikema. In juni 2007 promoveerde hij cum laude op het proefschrift *Terawatt-intensity few-cycle laser pulses*. Momenteel werkt hij als post-doc bij de vakgroep Biofysica aan de VU.

switte@nat.vu.nl

## NTvN-Prijsvraag – Uitslag

Eind vorig jaar zijn bijna en pas gepromoveerde natuurkundigen uitgenodigd om mee te doen met de veertiende NTvN-Prijsvraag. Deze prijsvraag wordt jaarlijks georganiseerd door het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde. De deelnemers worden uitgedaagd om een goed en leesbaar artikel te schrijven over hun promotieonderzoek.

De commissie, bestaande uit Wilfried van Sark, Peter Siegmund en Coen Swarts had de taak om de zeven inzendingen voor de NTvN-prijsvraag 2007/2008 te rangschikken. Er was direct overeenstemming over de eerste prijs. Ook was snel duidelijk welke twee inzenders de tweede of de derde prijs moesten krijgen, maar wel was nog enig beraad nodig om de volgorde van deze twee te bepalen. Ook de inzendingen die niet bij de eerste drie horen zijn op z'n minst goed en interessant. Mirjam Leunissen wint met haar *Bouwen met een microscopische blokkendoos* de derde prijs. De blokken zijn hier de deeltjes in colloïdale suspensies. Door deze deeltjes positief en negatief te laden, of te onderwerpen aan een elektrisch veld, heeft zij een grote rijkdom aan nieuwe kristalstructuren kunnen bouwen. Door het elektrisch veld te veranderen kan zij bovendien snel de eigenschappen van de kristallen wijzigen.

Yves Rezus wint met zijn *Water in beweging* de tweede prijs. De snelle rotaties van watermoleculen in de vloeibare fase heeft hij onderzocht met zeer korte laserpulsjes met een duur van 100 femtoseconde ( $\text{femto} = 10^{-15}$ ). Deze methode heeft hij gebruikt om het gedrag van water rondom olieachtige moleculen te bestuderen. Dit is interessante natuurkunde, die bovendien van belang is bij allerlei biologische processen, zoals het vouwen van eiwitmoleculen.

Stefan Witte wint met zijn *Het temmen van een terawatt* de eerste prijs. Hij heeft kans gezien ultakorte laserpulsjes te maken met een duur van slechts 8 femtoseconde, met een piekvermogen van 2 terawatt. Hiermee is het mogelijk om de bewegingen van atomen in moleculen te volgen of zelfs te sturen. Dit artikel, dat hiernaast is afgedrukt, voldoet in hoge mate aan alle criteria die de commissie heeft gehanteerd: vernieuwend onderzoek, goed taalgebruik, duidelijk gepresenteerd en uitstekende figuren. De prijsuitreiking is tijdens FYSICA 2008 in Nijmegen.

### Uitslag:

1. Stefan Witte, gepromoveerd aan de Vrije Universiteit, *Het temmen van een terawatt*
2. Yves Rezus, gepromoveerd aan de Universiteit van Amsterdam, *Water in beweging*
3. Mirjam Leunissen, gepromoveerd aan de Universiteit Utrecht, *Bouwen met een microscopische blokkendoos*

Stefan, Yves, Mirjam: gNTvNefeliciteerd!

Peter Siegmund,

Namens de commissie NTvN-Prijsvraag 2007/2008.

**S**nelle en intense laserpulsjes zijn op zich al veelbelovend voor bijvoorbeeld materiaalbewerking vanwege het hoge piekvermogen, maar ook op wetenschappelijk gebied zijn ultrasnelle lasers van grote waarde. Het is al gebleken dat lichtpulsjes met een duur van slechts enkele femtoseconden ( $\text{fs}$ ,  $10^{-15}$  seconde) bruikbaar zijn voor het controleren van chemische reacties [1]. Dit komt doordat de bewegingen van atomen in een molecuul zich op de tijdschaal van enkele femtoseconden tot nanoseconden afspelen. Met lichtpulsjes die sneller zijn is het mogelijk om zulke bewegingen te volgen en zelfs te sturen.

Een ambitieuze volgende stap is het sturen van elektronen met lichtpulsjes. Elektronen zijn duizenden malen lichter dan atomen. Hun bewegingen zijn dus veel sneller, en vinden plaats op sub-femtoseconde tijdschaal: dit is het domein van de attosecondefysica [2]. Ook de energie die nodig is om elektronen vrij aan het bewegen te krijgen is vaak hoger, aangezien de elektronen in een atoom een sterke Coulombaantrekking van de kern ondervinden. Voor attosecondefysica zijn dus lasers nodig die een extreem korte pulsduur combineren met genoeg vermogen om de Coulombinteractie van elektronen met de atoomkern te overwinnen.

# en van een terawatt

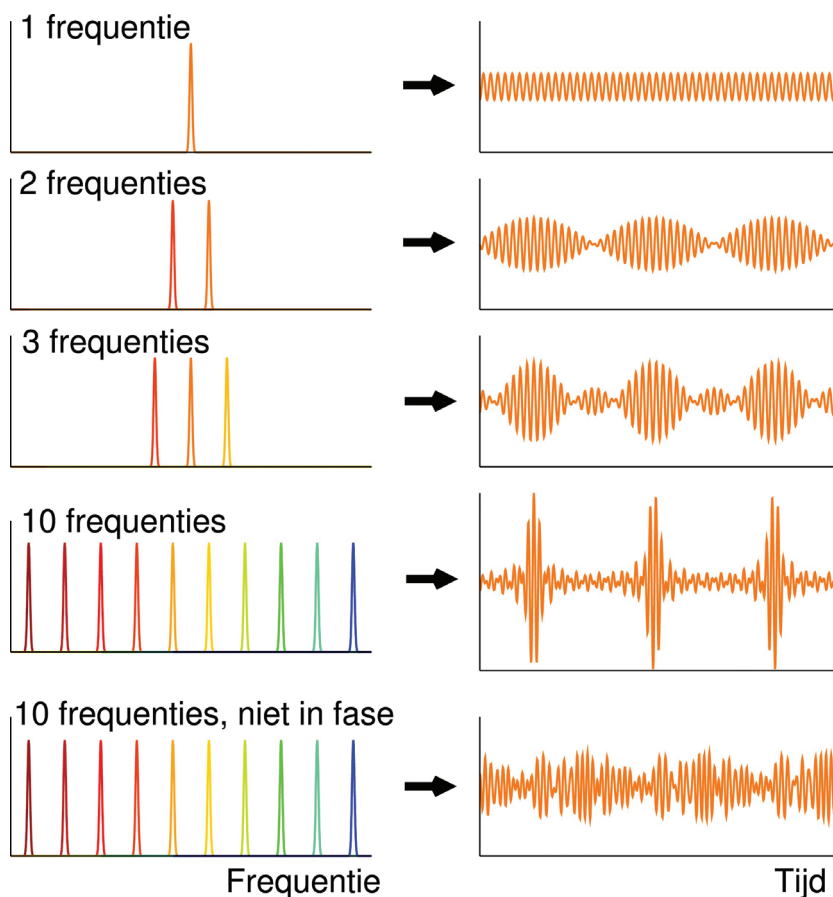
## htpulsen volledig onder controle

De 21<sup>e</sup> eeuw wordt nu al de eeuw van het foton genoemd. De voornaamste reden voor deze ambitieuze naamgeving is het enorme potentieel van licht voor wetenschap, industrie, en alledaagse toepassingen. Voorbeelden van het gebruik van licht variëren van het afspelen van dvd's tot het controleren van chemische reacties, en van extreem nauwkeurige tijdsmetingen tot hart- en vaatchirurgie. Naarmate de toepassingen veeleisender worden, groeit ook de vraag naar precies gecontroleerde lichtbronnen. Eén van de snelst opkomende onderzoeksvelden is de ontwikkeling van ultrasnelle lasers, die extreem korte en intense lichtflitsen kunnen uitzenden met een hoge mate van coherentie. Stefan Witte

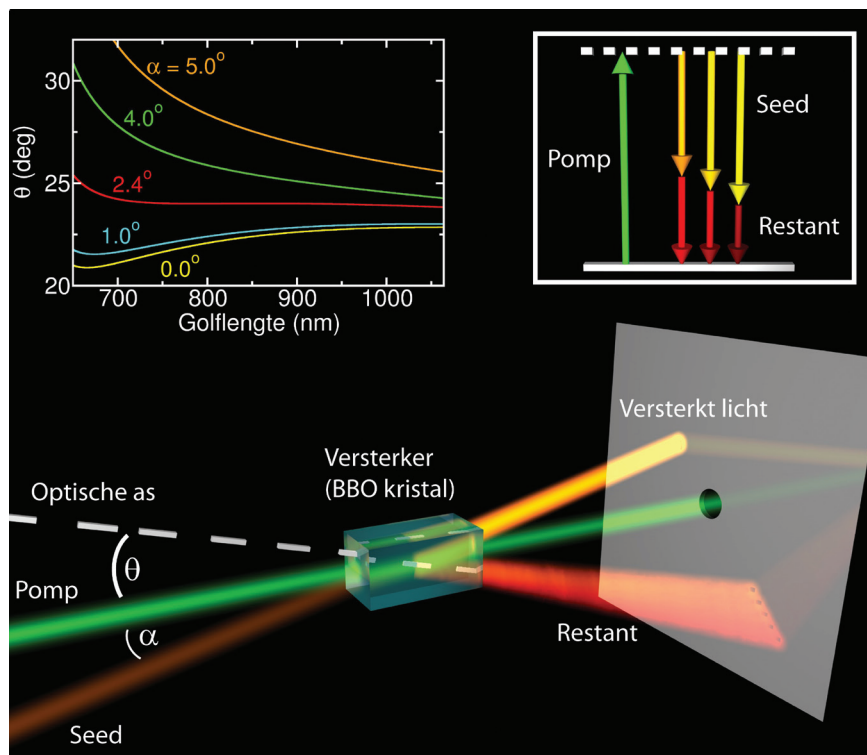
### Ultrakorte laserpulsen

Voor het maken van lichtpulsen zijn lichtgolven bij meerdere frequenties nodig (met andere woorden verschillende kleuren licht). Hoe dit werkt is te zien in figuur 1: terwijl een lichtbundel van één frequentie een constante amplitude heeft, leidt het toevoegen van een tweede golf met een andere frequentie tot een intensiteitsmodulatie, oftewel een zweving. Het toevoegen van extra frequenties zorgt ervoor dat de modulatie steeds sneller en intenser wordt. Dit geeft ons een recept voor het maken van extreem korte lichtpulsen, namelijk door het coherent samenvoegen van een groot aantal lichtgolven met verschillende frequenties. Echter, simpelweg lichtgolven van verschillende frequenties overlappen leidt niet automatisch tot pulsen. Een noodzakelijke voorwaarde voor het vormen van pulsen is dat alle lichtgolven met elkaar in fase zijn: als alle golven tegelijk op hun maximum zijn, tellen deze lokaal op tot een zeer intense lichtpuls.

Een reeks lichtgolven met verschillende frequenties wordt bijvoorbeeld gevormd door de longitudinale modes van een laser. In zogenaamde gemodelockte lasers worden al deze frequenties netjes in fase gehouden, en worden dus pulsen gevormd. Gemodelockte lasers zijn vooralsnog



**Figuur 1** Coherent optellen van golven met verschillende frequenties leidt tot pulsen, mits alle golven in fase zijn.



**Figuur 2** Schematische weergave van een optische parametrische versterker. Rechtsboven is het energieschema voor de interactie weergegeven. De grafiek linksboven laat zien bij welke hoeken *fasematching* optimaal is: als  $\alpha = 2,4^\circ$  en  $\theta = 23,9^\circ$  kan een zeer breed spectrum worden versterkt.

de meest efficiënte manier gebleken om ultrakorte lichtpulsen te maken: state-of-the-art lasers gebruiken het zeer breedbandige Titaan-Saffier als lasermedium, en kunnen pulsen uitzenden met een duur van slechts 5 femtoseconden.

### Optische parametrische versterking

De basis van onze opstelling is een zelfgebouwde Titaan-Saffierlaser, die 6,2 fs pulsen levert met 5 nanoJoule energie per puls. Hoewel dit al overeenkomt met een piekvermogen van 800 kW, is verdere versterking van de pulsen noodzakelijk om te kunnen concurreren met de Coulomb-aantrekking die elektronen van de atoomkern ondervindt.

De methode die wij gebruiken voor het versterken van laserpulsen heet optische parametrische versterking (Engels: *optical parametric amplification*, oftewel OPA). Deze methode komt voort uit de niet-lineaire optica: in een medium met een niet-lineaire respons kan een foton met een hoge energie opsplitsen in twee nieuwe fotonen met lagere energie (figuur 2, rechtsboven). Via dit principe kunnen fotonen gecreëerd worden bij

een frequentie van een al bestaande, zwakke *seedpuls*, en kan dit proces dus effectief als versterker gebruikt worden.

Deze versterking zal alleen optreden als de golven coherent optellen. Het is dus van belang dat de verschillende golven in het medium in fase blijven lopen. Om dit te kunnen realiseren moeten we de brekingsindex van het medium voor de verschillende golflengtes kunnen instellen. Dit is mogelijk door een dubbelbrekend kristal als medium te nemen, en de hoeken tussen de optische as van het kristal en de laserbundels te variëren, zoals in figuur 2 is weergegeven. Met de juiste combinatie van hoeken kan zulke *fasematching* over een extreem breed spectrum bereikt worden.

Een OPA is een efficiënte versterker: een lichtpuls kan binnen enkele millimeters vele duizenden malen in vermogen toenemen, waardoor het versterkersysteem compact opgebouwd kan worden. Een andere eigenschap van OPA is dat energie direct wordt overgedragen van de pomp- naar de seedpuls, zonder eerst in het medium te worden opgeslagen. Dit is een groot voordeel bij het versterken naar hoge pulsenergie.

### Versterken tot extreme intensiteit

Als de lichtpulsen in de OPA zo intens worden dat ze de versterker beschadigen, lijkt verder versterken niet mogelijk meer. Een truc waarmee pulsen toch nóg krachtiger kunnen worden gemaakt heet *chirped pulse amplification* (CPA). *To chirp* (letterlijk vertaald: tsjilpen) staat voor het moduleren van frequenties in de tijd, en effectief is dat wat er bij CPA gebeurt (zie figuur 3): de verschillende kleuren in een lichtpuls worden in de tijd uit elkaar getrokken met behulp van dispersie, waardoor de puls effectief langer en dus minder intens wordt. Deze verlengde puls kan veilig worden versterkt, waarna de kleuren van de puls weer bij elkaar geveegd worden. Het overlappen van de verschillende golflengtes kan in de praktijk gerealiseerd worden met behulp van prisma's of tralies. Pas in deze pulscompressie-stap bereiken de pulsen hun maximale intensiteit.

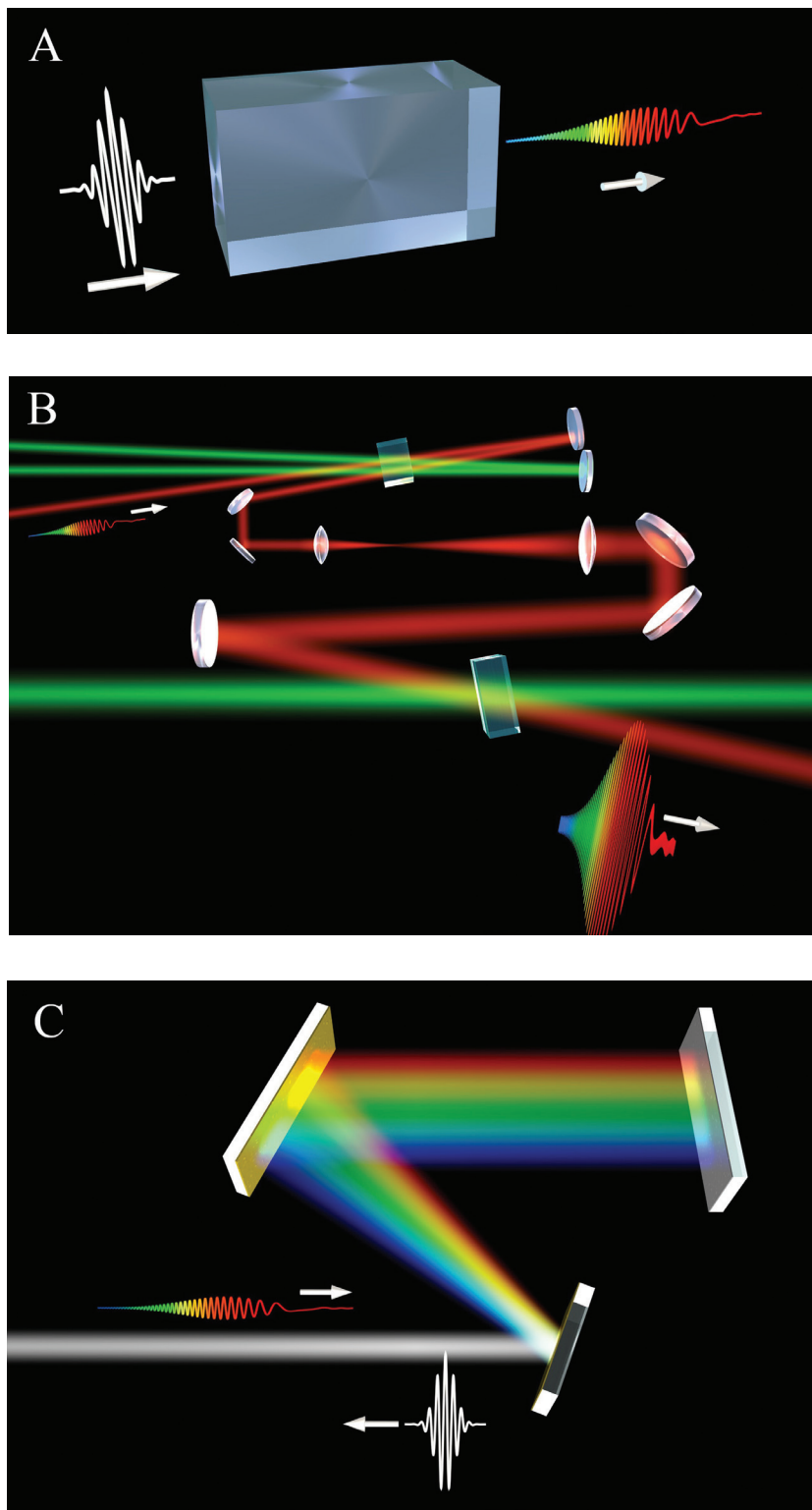
Door nu OPA met CPA te combineren, krijg je een geheel nieuwe productiemethode voor extreem korte lichtpulsen met extreem piekvermogen: *optical parametric chirped pulse amplification*, oftewel OPCPA. Met de OPCPA-techniek zijn we erin geslaagd om lichtpulsen

te maken met een piekvermogen van 2 terawatt, en een pulsduur van 7,6 fs [3]! Deze pulsen zijn zo kort, dat ze slechts 2,7 oscillaties van het elektrisch veld van licht bevatten.

### Intense lichtpulsen onder controle

Hoewel OPCPA goed werkt, blijft het in de praktijk een fikse uitdaging om ultrakorte en intense laserpulsen goed onder controle te krijgen. Vooral de laser die de pomppulsen levert moet van goede kwaliteit zijn; deze laser hebben we speciaal ontwikkeld voor ons versterkersysteem. De pomppulsen hebben een golflengte van 532 nanometer (nm), een energie van 150 mJ, en een pulsduur van 60 picoseconde (ps). We verlengen de *seedpulsen* tot 15 ps, en moeten deze nu in het versterkerkristal overlappen met de pomppulsen, in zowel ruimte als tijd. Met behulp van snelle elektronica zorgen we ervoor dat de beide lasers hun pulsen tegelijkertijd uitzenden, met een precisie van beter dan een picoseconde. In drie OPA-versterkingsstappen (zie figuur 3) worden de pulsen in totaal 30 miljoen maal versterkt. Het versterkermedium in elke stap is een 5 mm lang  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-(BBO) kristal. Na versterking worden de pulsen weer gecomprimeerd met behulp van een tweetal tralies. Deze compressie is echter nog niet voldoende om de pulsen echt kort te krijgen.

Dat pulscompressie in de praktijk zeer uitdagend is, wordt direct duidelijk als je je realiseert dat de golflengte van het versterkte licht slechts 800 nm is. Voor goede pulscompressie is het noodzakelijk dat alle verschillende kleuren licht tot op een fractie van een golflengte overlappen: en dat terwijl we de puls net met een factor 2000 opgerekt hebben, en de weglengte door het hele versterkersysteem ongeveer 10 meter bedraagt. De toegevoegde chirp moet dus zeer nauwkeurig gecompenseerd worden. Hiervoor maken we gebruik van een *pulsshaper* (zie figuur 4): dit apparaat bestaat uit 640 liquid-crystal cellen met een instelbare brekingsindex. Door het spectrum van de pulsen te spreiden met een tralie, kunnen we de verschillende kleuren licht elk een andere (instelbare!) optische weglengte laten ondergaan. Met deze *pulsshaper* kunnen we de verschillende kleuren licht precies op elkaar leggen: we kunnen de spectrale fase van de pulsen

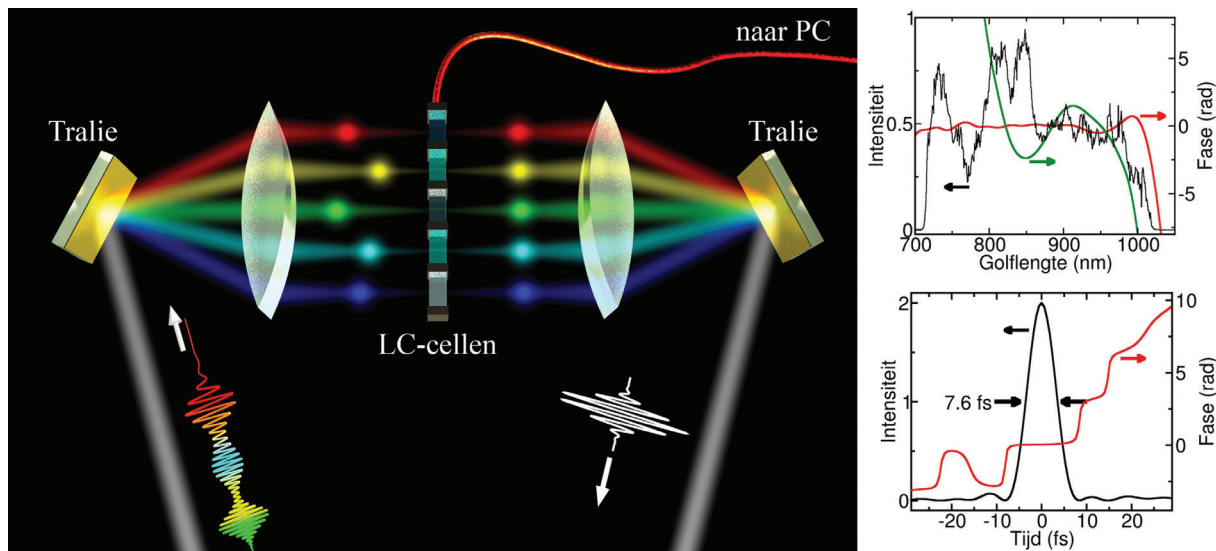


**Figuur 3** OPCPA in drie stappen: A) De puls wordt uitgerekt door middel van dispersie. B) De uitgerekte puls wordt versterkt in onze driestaps-OPA. C) De versterkte puls wordt weer gecomprimeerd met een tweetal tralies.

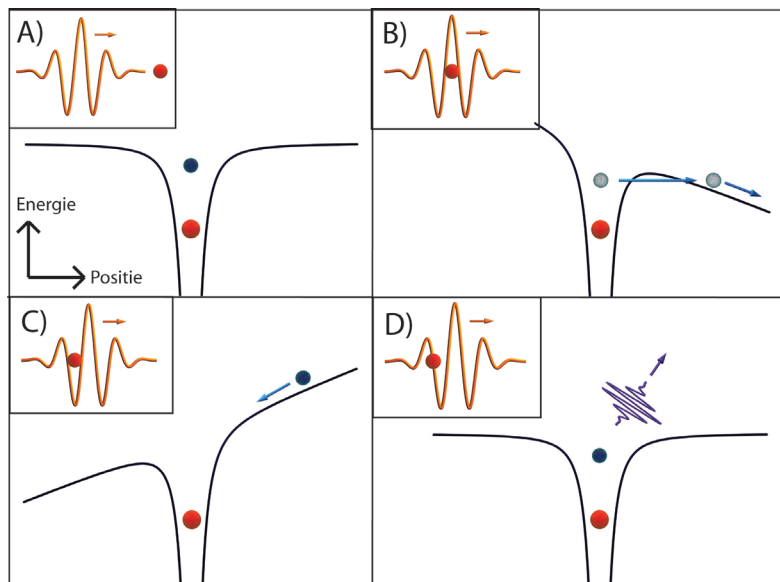
(het faseverschil tussen de verschillende kleuren binnen de puls) tot op 0,5 rad constant krijgen (figuur 4). Dit komt neer op een controle over de timing tussen de verschillende kleuren van beter dan 0,2 fs, oftewel 60 nm weglengteverschil.

Onze metingen wijzen uit dat het OPCPA-proces de fase van de versterkte lichtpulsen nauwelijks verstoort [4], waardoor de exacte vorm van het elektrisch veld van licht precies controleerbaar is.

Dit lasersysteem vormt de basis voor



**Figuur 4** De werking van een *pulsshaper*. Een tralie spreidt de kleuren, waarna deze naast elkaar worden gefocuseerd in een rij *liquid-crystal* cellen met een instelbare brekingsindex (in werkelijkheid bevat onze *pulsshaper* 640 cellen). Hiermee kan het relatieve weglengteverschil tussen de lichtgolven zeer precies gecontroleerd worden. Rechtsboven: het versterkte spectrum (zwart), en de spectrale fase zonder (groen) en met (rood) de *pulsshaper* geactiveerd. Rechtsonder: de uiteindelijke, goed gecompriëerde pulsvorm in de tijd.



**Figuur 5** Hoge-harmonische generatie. A) De ongestoorde Coulombpotential van een atoom, het elektron bevindt zich nabij de kern. B) Het atoom in een maximum van het lichtveld: het elektron tunnelt door de barrière en wordt versneld in het veld. C) Het lichtveld verandert van teken, waardoor het elektron weer richting kern gestuurd wordt. D) Het elektron botst op het achtergebleven atoom, waarbij een XUV-foton wordt uitgezonden.

nieuw onderzoek op het gebied van lichtmaterie-interactie en elektronendynamica, met spectaculaire tijdsresolutie.

### Gestuurde elektronen leveren coherente röntgenstraling

Een interessant experiment dat reeds met onze laser is uitgevoerd, is de productie van coherente straling met een zeer korte golflengte, zogenaamd extreem-ultraviolet (XUV) licht. Zulke straling kan worden gemaakt via een proces

dat hoge-harmonische generatie (HHG) wordt genoemd. Dit is een voorbeeld van het sturen van elektronen met intense lichtvelden. Het principe van HHG is weergegeven in figuur 5: een intense lichtpuls kan de Coulombpotential van een atoom zodanig beïnvloeden, dat een elektron via quantumtunneling van het atoom losgemaakt wordt. Dit elektron wordt versneld door het elektrische veld van de lichtgolf. Omdat het veld oscilleert, zal het elektron na een halve periode weer teruggestuurd worden en

op het achtergebleven atoom botsen. Bij deze botsing kan de opgebouwde kinetische energie van het elektron worden uitgezonden in de vorm van een XUV-foton. Dit proces werkt beter naarmate de pulsduur korter wordt: met onze pulsen behoort zelfs de productie van zachte röntgenstraling (golflengte  $< 1$  nm) tot de mogelijkheden. Een bijzondere eigenschap van HHG is dat de uitgezonden XUV-straling coherent is: het heeft een vaste faserelatie ten opzichte van de initiële laserpuls. Dit betekent dat we de fase van het geproduceerde XUV kunnen controleren via fase van de laserpulsen. Dankzij deze coherentie kunnen we de XUV-pulsen gebruiken voor bijvoorbeeld precisiespectroscopie met fasestabiele pulsen [5], als test van quantumelektrodynamica. Ook de constructie van XUV-atoomklokken die werken met zeer hoogfrequente, maar precies gecontroleerde lichtgolven behoort tot de mogelijkheden. Intense, ultrasnelle lasers zijn veelbelovend in de eeuw van het foton...

### Referenties

- 1 A.H. Zewail, *Science* **242** (1988), 1645.
- 2 R. Kienberger et al., *Science* **297** (2002), 1144.
- 3 S. Witte, R.Th. Zinkstok, A.L. Wolf, W. Ubachs, W. Hogervorst en K.S.E. Eikema, *Opt. Express* **14** (2006), 8168.
- 4 R.Th. Zinkstok, S. Witte, W. Hogervorst en K.S.E. Eikema, *Opt. Lett.* **30** (2005), 78.
- 5 S. Witte, R.Th. Zinkstok, W. Ubachs, W. Hogervorst en K.S.E. Eikema, *Science* **307** (2005), 400.