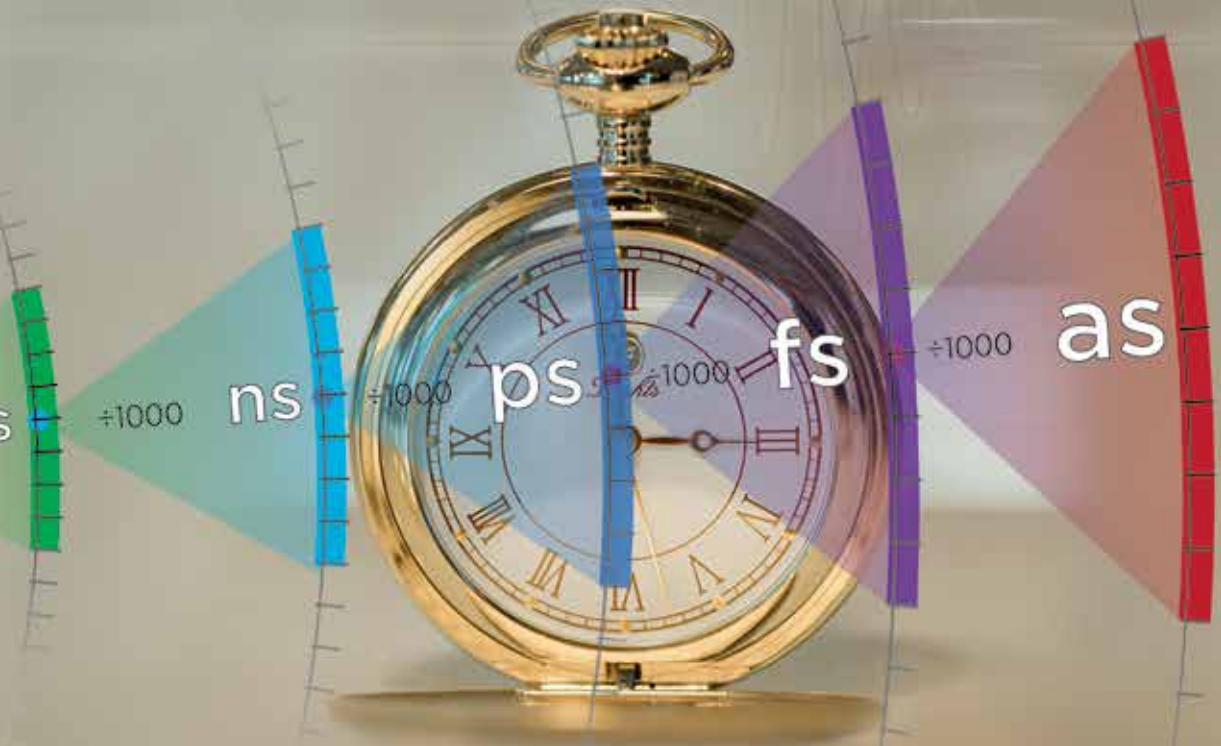


KOSMOS

attofysik

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2025



LASRAR FÖR ATTOFYSIK- VETENSKAP

© ANNE-LISE VIOTTI OCH CORD ARNOLD



Artikeln publiceras under Creative Commons-licensen CC BY-NC-SA 4.0
För bildmaterial med källhänvisning
gäller samma upphovsrättsliga
regler som för källan.

f SVENSKA
FYSIKER
SAMFUNDET

En förutsättning för fysik på attosekunds-skalan, och för alstring av attosekundspulser, är extremt snabba lasersystem. Anne-Lise Viotti och Cord Arnold går i denna artikel igenom förutsättningarna för dessa extrema ljuskällor och de visar på tekniska lösningar.



Anne-Lise Viotti

tog ingenjörsexamina från Institut d'Optique Graduate School i Frankrike och KTH i Stockholm, 2014. Hon dispute-rade i tillämpad fysik vid KTH 2019. Därefter en gemensam postdok mellan Lunds universitet och DESY i Tyskland. Sedan 2023 är hon biträdande lektor vid institutionen för fysik vid Lunds universitet och arbetar med ultrasnabba optiska system. Foto: Kumri Altunkaynak.



Cord Arnold

erhöll sin doktorexamen från Leibniz-universitetet i Hannover, Tyskland, 2007. Han var postdok vid Laboratoire d'Optique Appliquée i Paris. Efter att ha börjat vid Lunds universitet 2010 byggde han upp en ny forskningsgren inom ultrasnabb laserforskning, innefattande nya avancerade ljuskällor, från infrarött till extremt ultraviolett.

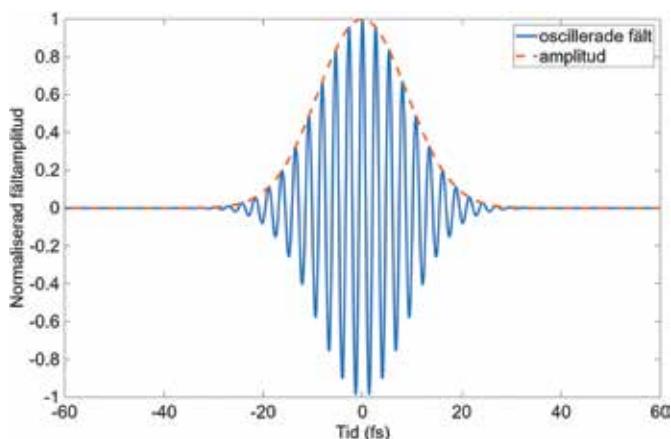
Bilden: Optisk uppställning som genererar ultrabred-bandiga femto-sekunds-laserpulser.

Lasrar för attofysikvetenskap

Att det idag finns forskning inom attosekundsfysik är en av många följder av laserns uppfinning i början av 1960-talet. Laserns viktigaste egenskaper, såsom koherens, förmågan att producera ultrakorta pulser och uppnå hög intensitet genom fokusering, är grundläggande för forskningen inom attofysik. Laserns genombrott möjliggjorde inte bara attofysiken utan banade också väg för helt nya forskningsområden. En ultrakort laserpuls kännetecknas av sin bärvåg, dvs. våglängden, eller frekvensen, hos det elektriska fältet och dess tidsprofil.

Definitionen av vad som utgör en ”ultrakort” pulslängd har kontinuerligt förskjutits under årtiondena, påverkat av framstegen inom laserteknik. Medan pulslängder i pikosekundsområdet ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$) betraktades som ultrakorta på 1970-talet, flyttades gränsen snabbt till femtosekunder ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) under 1980-talet. Numera används ofta termen ”få cykler” för att karakterisera de kortast möjliga pulserna. En puls med få cykler omfattar endast några få svängningar av bärvågen under dess envelopp. Den yttersta gränsen är *enkelcykelpulser*, vars längd beror på bärvågens våglängd. För en typisk laser i det nära infraröda spektralområdet med en bärvåglängd på omkring $\lambda = 800 \text{ nm}$ har en enkelcykelpuls en längd på $\lambda/c \approx 2,7 \text{ fs}$. Figur 1 illustrerar det elektriska fältet för en ultrakort flercykelpuls.

Intensiva ultrakorta laserpulser är en integrerad del av generering av höga övertoner och alstringen av attosekundspulser. För en introduktion till den underliggande fysiken i genereringsprocessen hänvisar vi till andra artiklar i årets Kosmos, t.ex. de av Anne L’Huillier och Mette Gaarde. Enligt de modeller som beskrivs i dessa kapitel är det tydligt att laserljuset är den viktigaste ingrediensen i genereringen av attosekunds-pulser. Faktum är att



Figur 1: En ultrakort laserpuls består av en bärvåg och fältets envelopp. I detta exempel ryms ca. 20 svängningar av bärvågen inom fältenveloppen.

många genombrott inom området för alstring av höga övertonsvågor har varit ett direkt resultat av framsteg inom lasertekniken. I det avseendet är det inte förvånande att många av de forskargrupper som har lagt grunden för attosekundsvetenskap ursprungligen sysslade med laserutveckling. I det följande kommer vi att kort belysa den tekniska utvecklingen av ultrasnabba lasrar, samtidigt som vi pekar på aktuella forskningsinriktningar.

Vägen från det första laserljuset till intensiva, ultrakorta laserpulser var inte rak, och många banbrytande uppfinningar har under resans gång sett dagens ljus. Än idag fortsätter många forskare och ingenjörer att flytta gränserna för vad lasertekniken kan göra. Det bör också noteras att tillämpningar av teknologin för ultrasnabba lasrar sträcker sig långt bortom attofysik. Ultrasnabba lasrar används idag inom många områden av grundläggande vetenskap, teknik och medicin. Tillämpningar som precisionsbearbetning av material, som inte kan matchas av konventionella verktyg, eller refraktiv kirurgi inom oftalmologi, är bara två exempel.

Kort historia om ultrakorta laserpulser

Generering

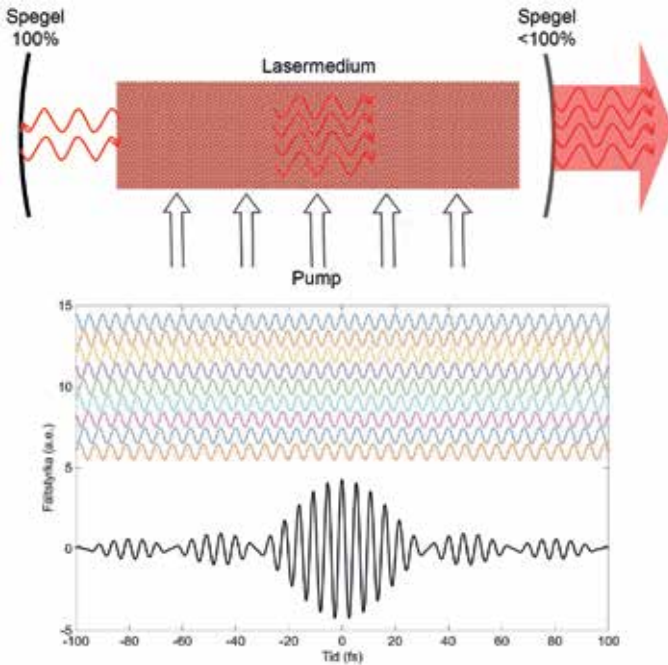
Den allra första lasern konstruerades av Theodor Maiman 1960, baserad på rubin som laseraktivt material. Rubin, som också är en ädelsten, består av safir med inbäddade kromjoner som ger rubi-

nen dess karakteristiska röda färg. Det är också kromjonerna som gör rubinen laseraktiv, en egenskap som gör det möjligt att lagra energi i kristallen och släppa ut den igen via stimulerad emission. Stimulerad emission är den process som ger laserljuset dess viktigaste egenskap, dvs. dess koherens, som manifesteras t.ex. genom möjligheten att bilda nästan helt parallella laserstrålar och möjligheten att koncentrera strålningen till punktstorlekar som motsvarar laserstrålningens våglängd.

Den enklaste konfigurationen för att skapa en laser är två speglar med ett lasermedium mellan dem. Reflektionerna i speglarna främjar emission av koherenta fotoner via stimulerad emission och laserstrålningen byggs successivt upp mellan speglarna. Om en av speglarna inte är totalreflekterande, dvs. om den släpper igenom en liten del av ljuset, kan laserstrålen användas utanför laserkaviteten, se illustrationen högst upp i figur 2. En sådan enkel laser, som beskriv ovan, avger vanligtvis inte korta pulser, utan ett antal så kallade moder, som kännetecknas av något olika våglängder, vilka bestäms av avståndet mellan speglarna.

Kort efter demonstrationen av den första lasern föddes området ultrasnabb optik, när man insåg att genom att låsa fasförhållandet mellan de olika lasermoderna kunde de konstruktivt interferera och bilda korta pulser. Modlåsning (eng. ”*mode-locking*”) möjliggör samtidig oscillation av ett stort antal högkoherenta, faslåsta moder inom laserkaviteten. Detta resulterar i ett fält som är nästan noll under större delen av tiden, förutom under korta intervall av konstruktiv interferens, där energin koncentreras till extremt korta pulser. Processen för modlåsning illustreras längst ner i figur 2.

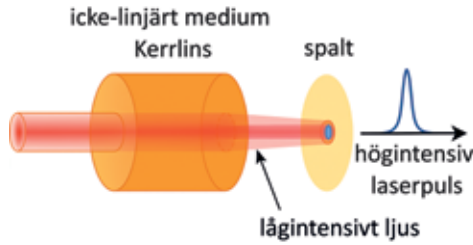
Till att börja med uppnådde man modlåsning genom att införa aktiva element, såsom elektrooptiska modulatorer, i laserkaviteten. Dessa kunde ge pulser kortare än 100 ps. På 1980-talet kom ett stort genombrott för ultrasnabb laserteknik genom ett nytt laseraktivt material — titandopad safir (Ti:Sa) — och upptäckten av självmodlåsning. Titansafir hade en oöverträffad förstärkningsbandbredd och självmodlåsningen gjorde att lasermoderna låstes på ett nästan magiskt sätt så att de bildade oöverträffat korta pulser. Denna upptäckt revolutionerade ultrasnabb laserteknik och bidrog i hög grad till tillgängligheten och spridningen av ultrakorta laserpulser. Även om det i början kallades ”magisk modlåsning” visade det sig snabbt att en annan egenskap hos ultrakorta



Figur 2: Överst: en laserkavitet med motriktade speglar och ett lasermedium. Nederst: Om fasförhållandet mellan olika kavitetsmoder är välbestämt, dvs. låst, kan de genom konstruktiv interferens (svarta grafen) bilda en ultrakort laserpuls.

laserpulser var orsaken till den oväntade effekten. När intensiva, ultrakorta ljuspulser propagerar i dielektriska medier, såsom glas, kan deras höga intensitet förändra mediets brytningsindex genom en effekt som kallas Kerr-ickelinjäritet. Detta kan leda till en effekt som kallas självfokusering, där en intensiv stråle kan dra ihop sig, dvs. självfokusera, under sin egen verkan i mediet. Man har visat att självfokusering minskar de förluster som en ultrakort puls upplever i kaviteten och därmed får fenomenet lasern att fungera i en ”magisk” mod, där den avger modlåsta, ultrakorta pulser. Figur 3 illustrerar effekten av modlåsning med *Kerrlins* för alstring av ultrakorta laserpulser.

Ett annat stort genombrott under 1980-talet var en lösning på hur ultrakorta pulser kunde förstärkas. Ultrsnabba oscillatorer, som kort beskrivits tidigare, kan endast leverera relativt svaga ultrakorta laserpulser, med pulsenergier som vanligtvis ligger i



Figur 3: Principen för modlåsning med Kerrlins: Endast den intensiva delen av ljuset passerar genom mitten av den cirkulära spalten, vilket resulterar i en ljusblixt.

nanojoule-intervallet (nJ). Även vid låg pulsenergi kan dock topp-effekten vara betydande. Den kan uppskattas till $P_0 \approx E/\tau$, där E är pulsenergin och τ är pulslängden. För en puls med en energi på 10 nJ och en pulslängd på 10 fs ligger topp-effekten redan i megawattområdet (MW). Förstärkta ultrakorta pulser kan lätt nå topp-effekter i terrawattområdet ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$) vid universitetslaboratorier och nyligen även i petawattområdet ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$) vid specialiserade anläggningar.

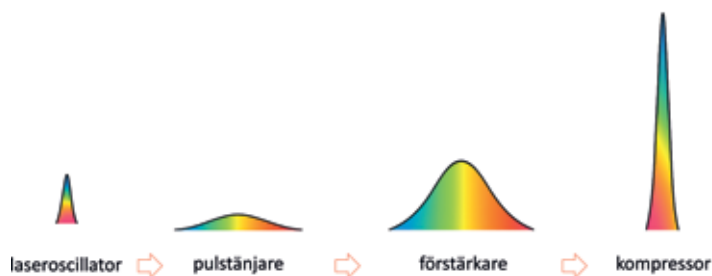
För att illustrera detta kan det vara lärorikt att sätta topp-effekten i relation till kända kraftkällor, som t.ex. en elbil med cirka 100 kW effekt, ett vindkraftverk på 1–2 MW eller ett kärnkraftverk som har en effekt på cirka 1 GW. Det blir uppenbart att även relativt lågenergiska ultrakorta pulser med en pulsenergi på några få millijoule har topp-effekter som motsvarar den sammanlagda effekten från hundratals kärnkraftverk. Men även om topp-effekten hos ultrakorta laserpulser kan vara extrem, förblir pulsenergin blygsam på grund av den korta pulslängden. Man kan göra en annan lärorik jämförelse. En mycket energirik puls med energi på 1 kJ och en pulslängd på 30 fs har en topp-effekt som överstiger 30 PW, men dess energi skulle bara räcka för att värma upp en liter vatten med en bråkdel av en grad.

Förstärkning

Intressant nog var samma fysik som möjliggjorde modlåsningen ett betydande hinder för förstärkning av ultrakorta pulser. Intensiva ultrakorta pulser modifierar det medium de propagerar sig i, inklusive laserförstärkare, vilket kan leda till skador på förstärkaren, om pulsenergin blir för hög. Denna begränsning övervanns ele-

gant genom uppfinningen av så kallade kvittrad pulsförstärkning (eng. *chirped pulse amplification*, CPA) 1985, som belönades med Nobelpriset i fysik 2018 till Donna Strickland och Gerard Mourou.

Det som driver så kallade icke-linjära växelverknningar, som självfokusering, är pulsens toppeffekt. Idén med CPA är att sträcka ut pulserna i tiden för att sänka toppeffekten före förstärkning och därefter komprimera dem igen till den ursprungliga längden, men med mycket högre pulsenergi. Principen illustreras i figur 4. Resultatet var omvälvande. Innan 1990-talet var energirika ultrakorta pulser tillgängliga endast vid ett fåtal nationella anläggningar. Tack vare Ti:Sa, Kerrlinsmodlåsning och CPA blev det möjligt att ha lasrar med ultrakorta pulser även på universitetsnivå, med mycket mer konkurrenskraftig prestanda. Detta hade en revolutionerande inverkan. Det har lett till att högeffektslaseranläggningar etablerats vid många universitet världen över under 1990-talet, vilket blev ett verkligt startskott för ultrasnabb optik som ett brett forskningsområde. Det har i sin tur också fått betydelse för andra områden, såsom teknik, kemi och medicin. Sverige har idag mycket väl etablerade ultrasnabba laseranläggningar i Lund, Stockholm, Göteborg, Uppsala och Umeå.



Figur 4: Principen för kvittrad pulsförstärkning, CPA. En ultrakort puls med låg energi sträcks ut i tiden före förstärkning, förstärks sedan och komprimeras slutligen igen för att undvika höga topp effekter i förstärkar-systemet och skador på optiska komponenter, samt försämring av strålkvaliteten. På så sätt kan mycket höga topp effekter uppnås.

Manipulation

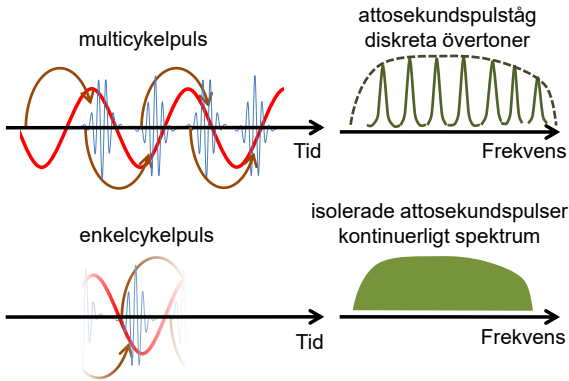
Titandopad safir har ersatt neodmium-glas och andra tidiga material för generering av ultrakorta laserpulser. Materialet blev den teknologi som möjliggjorde studier av hög övertongenerering

under 1990-talet, samt för att sedan början av 2000-talet rutinmässigt alstra attosekundspulser och utföra experiment med tidsupp-lösning i attosekundsområdet. På senare tid används även andra ultrasnabba lasertekniker, som främst utvecklats för industriella och medicinska tillämpningar, inom attofysiken. De mest fram-trädande är ytterbium- och tuliumbaserade material som emitterar vid 1030 nm och $2\ \mu\text{m}$. Jämfört med Ti:Sa har dessa nya ultrasnabba lasertekniker ett antal fördelar, såsom kompakthet, pris och effektivitet. Samtidigt ligger pulslängder i intervallet några hundra femtosekunder och är därmed betydligt längre än för Ti:Sa.

Under de senaste tio åren har ett antal tekniker utvecklats för att temporärt komprimera pulserna som emitteras av ytterbium- och tuliumbaserade lasrar till samma intervall som man var van vid med Ti:Sa. Detta har bidragit till en bred användning av ytterbiumlasrar av industriell kvalitet inom attofysiken. Tuliumbaserade ultrakortpulslasrar är en ny teknik för generering av attosekundspulser, med god potential för att öka fotonenergin upp mot det mjuka röntgenspektrumet. Enligt våglängdsskalningen för generering av höga övertoner, dvs. $E_{\text{foton}} \propto \lambda^2$, kan en drivande laser med bärvåglängd på $2\ \mu\text{m}$ alstra sex gånger högre fotonenergi än vad en laser på 800 nm kan. Samtidigt minskar avsevärt omvandlingseffektiviteten för hög övertonsgenerering mot det mjuka röntgenområdet, vilket kräver lasrar med mycket hög effekt för att ett betydande fotonflöde ska kunna uppnås.

Experiment inom attofysik skiljer sig åt främst i två avseenden: antingen genereras höga övertoner, motsvarande tåg av attosekundspulser, eller så genereras enskilda attosekundspulser, motsvarande ett kontinuerligt spektrum. Kraven på drivlasern är helt olika för de två fallen. Alstring av attosekundspulståg är enkelt att åstadkomma med flercykelpulser, när intensiteter omkring $I = 10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2$ uppnås. Som förklarats i andra artiklar i volymen leder varje halvcykel av drivfältet till emission av en attosekundspuls i tåget. Ju fler halvcykler som bidrar, desto bättre definierade och spektralt smalare blir de höga övertonerna. För att uppnå enstaka attosekundspulser måste emissionen reduceras till en enda halvcykel av den drivande laserpulsen. Det finns olika metoder för att åstadkomma detta, varav de flesta bygger på att från början ha kortare laserpulser, dvs. i intervallet några få till en enda cykel. Alternativa metoder är att manipulera polarisationstill-

ståndet för den drivande laserpulsen i tidsdomänen. För att hög övertonsgenerering ska vara effektiv krävs linjär polarisation. Om polarisationstillståndet för en puls manipuleras på ett sådant sätt att endast en enda halvcykel är linjärt polariserad, medan resten av pulsen har cirkulär eller elliptisk polarisation, kan emissionen reduceras till en enda attosekundspuls. Figur 5 illustrerar alstring av ett tåg av attosekundspulser och enskilda attosekundspulser.

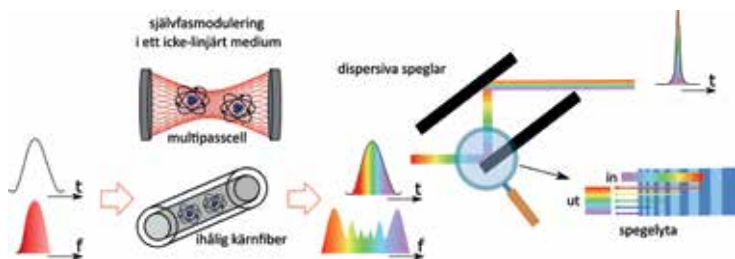


Figur 5: attosekundspulsgenerering: (överst) Multicykel-drivpulser genererar tåg av attosekundspulser med ett spektrum bestående av höga övertoner; (nederst) om emissionen begränsas till en enda halvcykel av drivpulserna, alstras enskilda attosekundspulser med ett kontinuerligt spektrum.

CPA-lasrar baserade på Ti:Sa avger vanligtvis flercykelpulser på omkring 25–30 fs, dvs. cirka 10 cykler. Ungefär samma längd kan uppnås med en ytterbiombaserad CPA, efter en initial temporär pulskompression. De mest använda för detta ändamål är multipass-celler (MPC). En puls som kopplas till en MPC, en optisk resonator, hinner med att färdas fram och tillbaka ett definierat antal gånger innan den kopplas ut igen. Vid varje rundtrip inträffar en icke-linjär växelverkan som leder till en gradvis breddning av spektrumet. Effekten liknar självfokusering, men i tidsdomänen, och kallas självfasmodulering. Brytningsindexets intensitetsberoende driver en ultrasnabb modulering av pulsens fas, vilket resulterar i spektral breddning. Därefter kan den ökade spektrala bandbredden omvandlas till kompression i tidsdomänen, när fasförhållandet mellan de olika spektrala komponenterna justeras, t.ex. med hjälp av dispersiva speglar.

För att erhålla pulser med få, eller till och med en enda cykel,

krävs ett ytterligare kompressionssteg. Tekniken MPC kan även utnyttjas i detta steg, men också mycket vanligt är att använda gasfyllda ihåliga kapillärer eller fiber. Vid detta tillvägagångssätt kopplas ultrakorta laserpulser till ihåliga glasrör med en innerdiameter på några hundra μm och en längd på några meter. Gasfyllningen, vanligtvis ädelgaser, förmedlar den icke-linjäritet som leder till spektralbreddningen. Denna metod genererar rutinmässigt pulser med en till två cykler, vilka kan användas för att generera isolerade attosekundspulser. Figur 6 illustrerar pulskompression i en MPC och ihåliga kapillärer, följt av dispersionshantering med hjälp av dispersiva speglar för att erhålla en slutlig ultrakort puls.



Figur 6: *Principen för pulskompression: självfasmodulering, och därmed spektralbreddning, uppnås i ett icke-linjärt medium (ofta en gas) via olika metoder, såsom multipassceller (överst) eller ihåliga kapillärer (nederst). Efter spektralbreddning är pulserna fortfarande långa och måste komprimeras i tiden med hjälp av t.ex. dispersiva speglar, såsom visas till höger, för att ultrakorta pulser ska erhållas.*

Avslutning

Sammanfattningsvis så kom det ett antal banbrytande innovationer inom ultrasnabb laserteknik under 1980-talet, vilket förändrade det globala landskapet för ultrakorta lasrar under början av 1990-talet. Med teknikens ökade tillgänglighet flyttades forskningen om tillämpningar av ultrasnabba lasrar, inklusive högövertongenerering, från nationella anläggningar till universitetslaboratorier. attofysiken har haft stor nytta av framstegen inom lasertekniken och har i sin tur kontinuerligt drivit tekniken framåt. Betydelsen av ultrasnabb laserteknik för grundforskning har bidragit till tre Nobelpris inom området (hittills!), nämligen 2005 års Nobelpris i fysik till Theodor Hänsch och John Hall för optiska frekvenskamstekniken, som baseras på ultrasnabba oscillatorer, 2018

års Nobelpris i fysik till Donna Strickland och Gerard Mourou för ”*chirped pulse amplification*” och 2023 års Nobelpris i fysik till Anne L’Huillier, Pierre Agostini och Ferenc Krausz för attofysik ❖

Vidare läsning

Fattahi, H. et al (2014). Third-generation femtosecond technology. *Optica* 1, 45–63.

Kling, M.F. et al (2024). Roadmap on basic research needs for laser technology. *J. Opt.* 27, 013002.

Strickland, D. (2024). Generating high-intensity ultrashort optical pulses. *Rev. Mod. Phys.*, 91, 030502.

