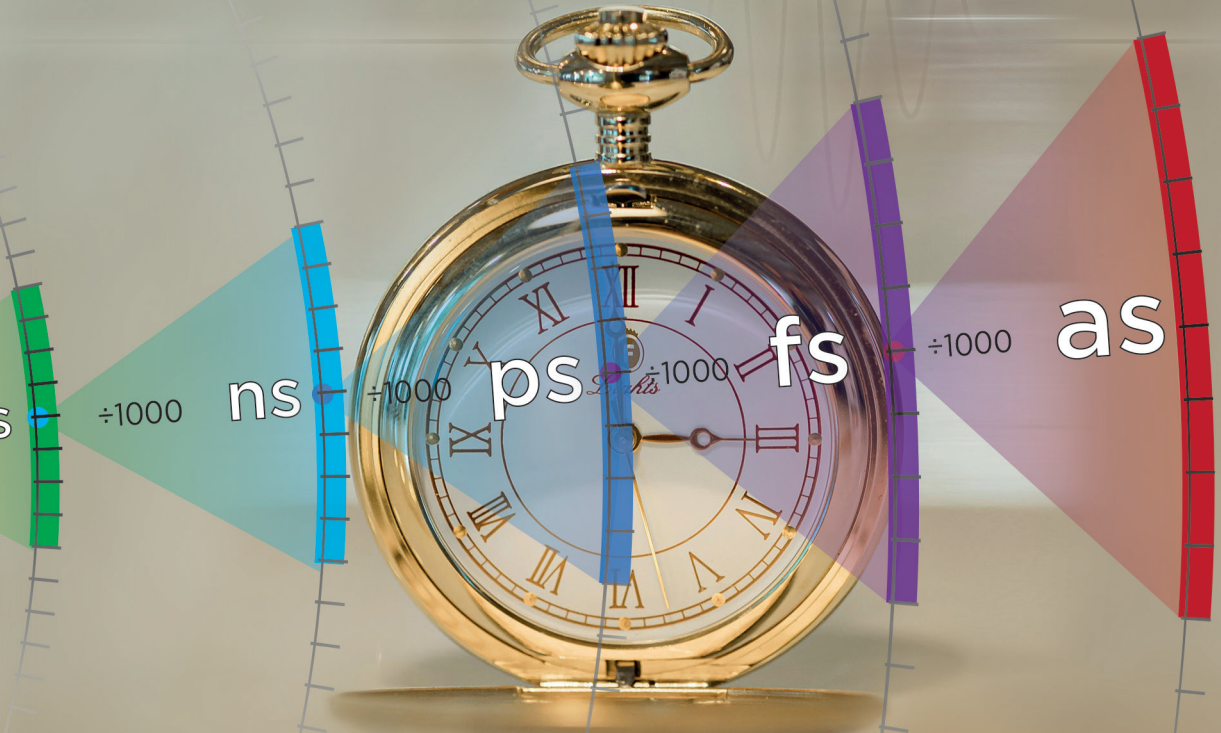


KOSMOS

attofysik

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2025



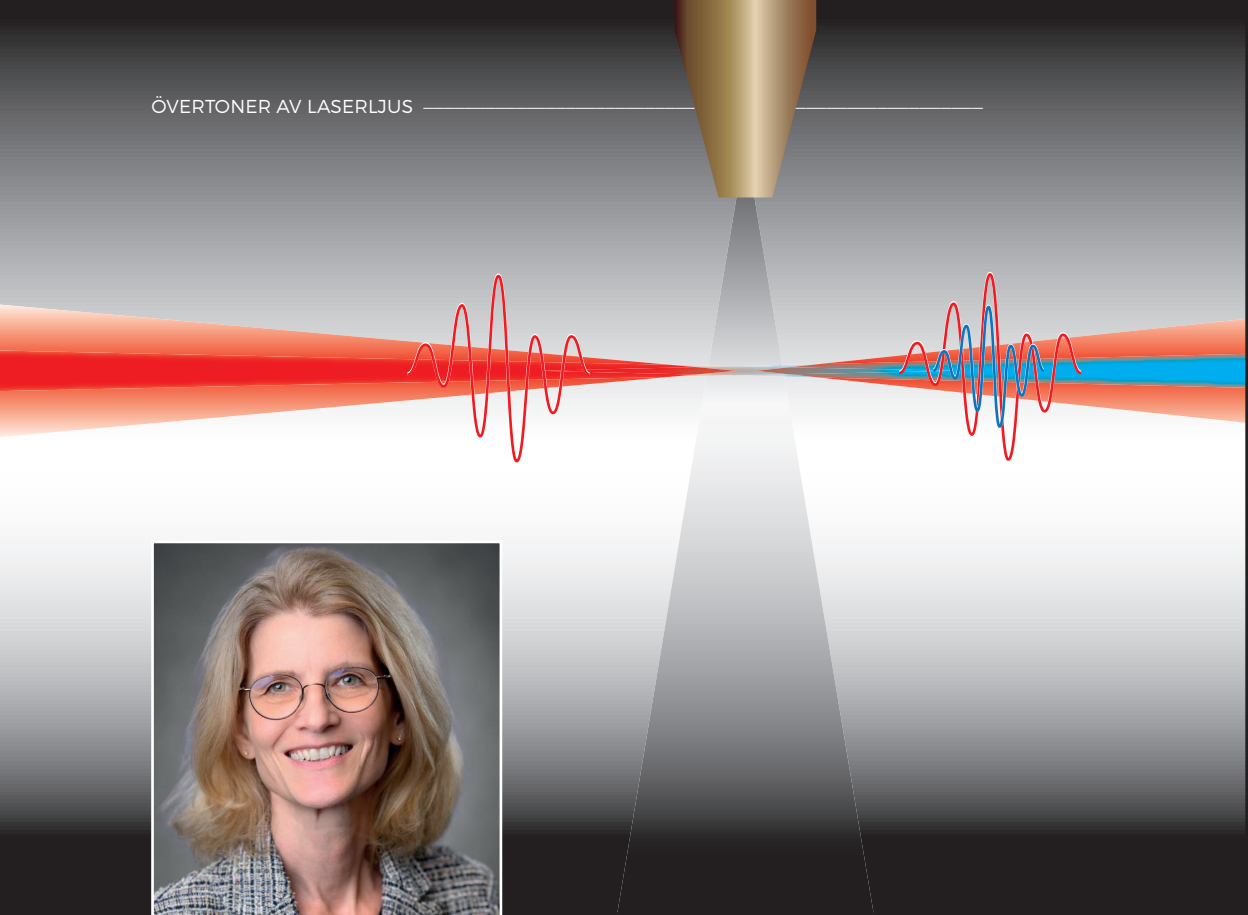
ÖVERTONER AV LASERLJUS

© METTE B. GAARDE



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

f SVENSKA
FYSIKER
SAMFUNDET



Mette B. Gaarde

är Boyd-professor vid Louisiana State University i Baton Rouge. Hon erhöill sin doktorsexamen i fysik från Köpenhamns universitet 1997, med sin doktorsavhandling utförd vid Lunds tekniska högskola. Hennes forskning fokuserar på hur elektronerna inuti atomer, molekyler och fasta ämnen reagerar när de utsätts för mycket korta laserpulser, och hon använder högpresterande datorsimuleringar för att studera produktionen av attosekundsljuspulser och dess dynamik.

Alstring av extremt korta laserpulser bygger till stor del på övertoner. Övertoner hör vi mest talas om när det handlar om musik, men i detta fall rör det sig om ljus. I denna pedagogiska artikel förklarar Mette B. Gaarde de viktigaste mekanismerna bakom fenomenet.

Bilden: En konstnärs tolkning av extremt snabba laserpulser.

Övertoner av laserljus

Övertoner förekommer naturligt, och i riklig mängd, inom musik: en knäppt gitarrsträng, en resonansrik orgelpipa och en sångröst producerar alla en grundton tillsammans med flera övertoner. Övertonerna har frekvenser som är heltaliga multiplar av grundtonen, och de ger ett instrument eller en röst dess karakteristiska klangfärg och fyllighet. Med ljus är det mycket svårare att skapa övertoner och de flesta av dem är inte synliga: man måste skicka högintensivt infrarött laserljus mot en kristall, eller en atommoln, och sedan noggrant mäta laserfrekvensens ultraviolette övertoner med en speciell detektor i vakuum. Precis som inom musiken kan dock resultatet bli vackert — när alla övertoner klingar tillsammans i harmoni bildar de ett tåg av attosekundspulser.

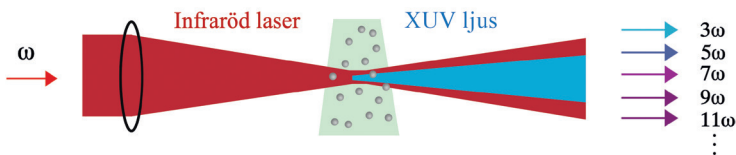
I och med Nobelpriset för fysik 2023 är höga harmoniska övertoner av ljus mest kända som vägen till attosekundspulser. Generering av övertoner sträcker sig dock långt bortom attosekundvetenskapen och är i hög grad ett aktivt forskningsområde, nästan 40 år efter den första upptäckten. Detta beror främst på den imponerande räckvidden och mångsidigheten av det laserliknande ljus som produceras genom generering av övertoner i starka laserfält, med sina korta våglängder som sträcker sig in i det extremt ultraviolette (XUV) spektralområdet, sin korta pulslängd och stora spektrala bandbredd, samt sin reproducerbarhet under välkontrollerade förhållanden. Höga övertoner används för att besvara viktiga frågor inom fysik, kemi, teknik och materialvetenskap. I ett mycket aktuellt exempel användes övertonsljus för att hitta en övergång i torium-229-kärnan, vilken är en lovande kandidat för nästa generations optiska klockor, som all satellitbaserad navigering är beroende av.

Även de grundläggande aspekterna av hur processen för att

generera övertoner fungerar är intressanta, särskilt i fasta material och vätskor. Detta beror på att det övertonsljus som avges från ett system drivet av ett starkt laserfält präglas av systemets struktur och dynamik. Genom att studera generering av övertoner från ett kvantmaterial som är intressant för dator- eller sensortillämpningar kan man till exempel lära sig mer om materialets elektroniska, spinn- eller topologiska egenskaper, eller optimera hur man bäst driver elektronik på en ultrasnabb tidsskala.

Övertongenerering i starka laserfält

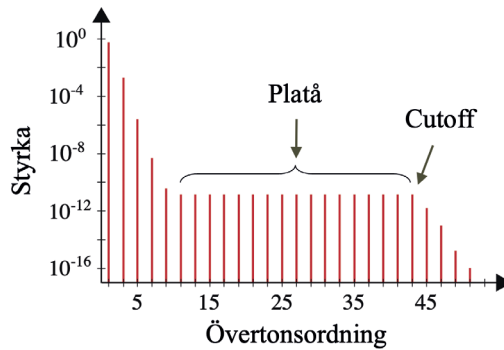
Generering av höga övertoner (eng. *high harmonic generation*, HHG) kan äga rum när en infraröd laserpuls fokuseras i en gas av atomer, såsom illustreras i figur 1. Fokuseringen samlar laserljusets energi till en liten punkt, så att den resulterande kraften skakar elektronerna våldsamt fram och tillbaka inuti atomerna. Detta resulterar i emission av laserliknande ljus i framåtriktningen, med frekvenser som är udda multiplar av laserfrekvensen. Processen för att generera övertoner kan fortsätta upp till mycket höga ordningar, beroende på laserintensiteten och atomtypen, och kan lätt nå tiotals eller till och med hundratals gånger laserfrekvensen. Eftersom ljusets våglängd är omvänt proportionell mot dess frekvens, innebär detta att våglängden för det emitterade ljuset är mycket kortare än laservåglängden och når långt in i spektrumets ultraviolette område.



Figur 1: Övertoner genereras när ljus från en intensiv infraröd laser fokuseras i en gas av atomer eller molekyler. Endast udda övertoner skapas, med frekvens 3, 5, 7, ... gånger laserfrekvensen.

Generering av höga övertoner i gaser upptäcktes först i slutet av 1980-talet av två olika forskargrupper. Dessa experiment möjliggjordes av utvecklingen av lasersystem med mycket hög effekt, som vid den tiden blev allt vanligare. De två grupperna, varav den ena inkluderade den nyligen Nobelprisbelönade Anne L’Huillier, överraskades av de kunde detektera många höga övertoner, i ett

fall upp till 33:e ordningens. En annan oväntad upptäckt var styrkan hos det övertonsljuset, som hade förväntats minska kraftigt med ordningen. Mätningarna visade dock att bortom de första få hade alla högre övertoner samma styrka och bildade en plåtå, som visas i figur 2. Detta verkade vara ett fantastiskt nytt sätt att framställa XUV-laserljus — något som annars är mycket svårt! Men vad hände egentligen i processen för att generera övertoner? Vad avgjorde den högsta ordningen som kunde emitteras och hur starkt det emitterade ljuset skulle bli? Och hur kunde genereringsprocessen för höga övertoner utnyttjas för att skapa en pålitlig ljuskälla för andra vetenskapliga tillämpningar?

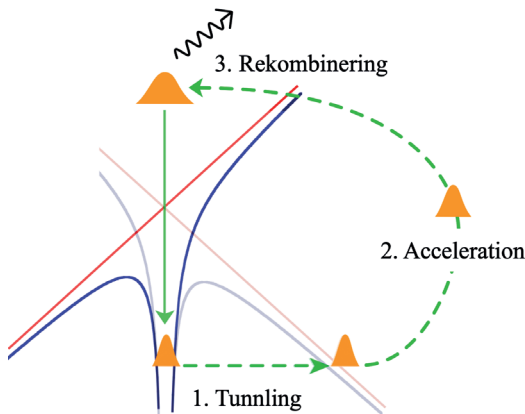


Figur 2: Skiss av ett övertonsspektrum, med sin karakteristiska plåtå där alla höga övertoner har samma styrka. Ursprungligen kom plåtån som en rejäl överraskning för fysikerna, som hade förväntat sig ett beteende liknande det som ses för de lägsta ordningarna.

Efter den första upptäckten ägnade såväl experimenter som teoretiker mycket tid och arbete åt att karakterisera och förklara processen för generering av övertoner. Numeriska studier visade att den maximala energin på plåtån (kallad brytpunktsenergin) bestämdes av en kombination av laserljusets intensitet och typen av atomer i gasen, vilket stämde överens med experimentella resultat. Experimentella studier visade att styrkan hos harmoniska svängningar berodde på laserljusets intensitet, men också på många andra faktorer, till exempel hur laserstrålen fokuserades och atomernas densitet i gasen. I början av 1990-talet ledde all denna ackumulerade kunskap till formuleringen av den modell för övertonsgenerering som vi fortfarande använder idag, baserad på hur en enskild elektron inuti en atom växelverkar med den kombi-

nerade kraften från laserfältet och jonkärnan. Denna modell kallas vanligtvis den semiklassiska modellen, eller trestegsmodellen, för generering av höga övertoner.

Innan vi går in på detaljerna i modellen är det viktigt att komma ihåg att en elektromagnetisk våg kan beskrivas med sitt oscillerande elektriska fält. Inom loppet av en optisk period, som för infrarött ljus är cirka tre femtosekunder, förändras det elektriska fältet från noll till maximum i en riktning, tillbaka till noll, och sedan likadant i motsatt riktning. Laserljuset som används för övertonsgenerering kommer i form av en kort puls som innehåller ett antal av dessa optiska perioder och har därmed en total varaktighet på tiotals eller hundratals femtosekunder. När en atom utsätts för laserpulsens kommer den negativt laddade elektronen inuti atomen att känna av den oscillerande kraften från laserfältet och denna kraft kommer att ”vicka” fram och tillbaka längs det elektriska fältets riktning.



Figur 3: Trestegsmodellen för övertonsgenerering. Kraften från laserfältet frigör en elektron från en atom och accelererar den till hög kinetisk energi. När elektronen återvänder till atomen kan den extra energin från laserfältet omvandlas till ljus, som avges i form av övertoner.

De tre stegen i den semiklassiska modellen illustreras i figur 3: I första steget drar den starka kraften från laserfältet elektronen åt ena sidan, vilket gör att (en del av) elektronen kan tunnla genom barriären som bildas av lasern i kombination med den attraherande kraften från den positivt laddade jonkärnan. I andra steget fort-

sätter laserfältet att accelerera elektronen bort från kärnan tills det ändrar riktning och börjar trycka elektronen i den andra riktningen. Om elektronen vänder kan den återförenas med jonkärnan i det tredje steget, och all energi som elektronen har fått från laserfältet kan avges i form av ljus. I denna modell beror elektronens energi vid återkomsten på den exakta tidpunkten då den tunnlar inom laserperioden, vilket ger maximal energi för den utsända fotonen enligt:

$$E_c = I_p + 3,2 U_p \quad .$$

Energien E_c i denna ekvation stämmer exakt överens med den brytpunktsenergi som tidigare förutsagts av numeriska simuleringar. I_p är atomens joniseringspotential och representerar elektronens potentiella energi, erhållen via tunnling, och $3,2 U_p$ är den maximala kinetiska energi som elektronen kan erhålla från acceleration i laserfältet. U_p är proportionell mot laserintensiteten och kvadraten av våglängden. Uttrycket för brytpunktsenergin kan alltså tala om för oss hur vi får högsta möjliga övertonsordningar: Vi bör använda en gas med hög joniseringspotential (till exempel neon eller helium) och ett drivande laserfält med hög intensitet och lång våglängd. Brytpunktslagen gäller inte för oändligt stora intensiteter och brytpunktsenergieer — vid en viss punkt blir intensiteten så hög att alla atomer i gasen joniseras och det blir mycket svårare för de återstående elektronerna att tunnla ut.

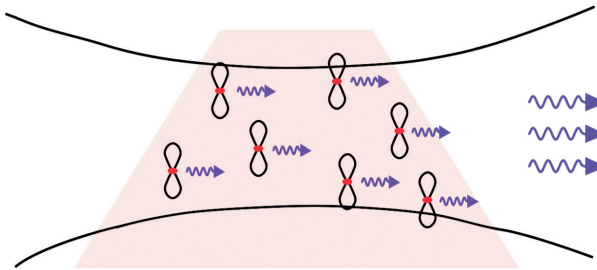
Den semiklassiska modellen beskriver vad som händer inom en halv period av laserfältet, men processen upprepas periodiskt när laserfältet oscillerar fram och tillbaka. Samtidigt som laserfältet trycker tillbaka elektronen mot atomen på ena sidan, driver det också tunnling och acceleration i motsatt riktning, och övertonsljus som emitteras i alla följande halvcykler av laserfältet kommer att interferera. Denna interferens är konstruktiv för de udda övertonerna och destruktiv för de jämna övertonerna, vilket leder till det karakteristiska övertonsspektrumet med udda övertoner som sträcker sig till den maximalt tillåtna brytpunktsenergin.

Det är både en enkel och lärorik övning att beräkna alla möjliga banor för en klassisk elektron som rör sig som resultat av ett oscillerande elektriskt fält, i fullständig analogi med den semiklassiska modell som beskrivs ovan. Med några få approximationer kan lösningen till Newtons rörelseekvation skrivas ner exakt och man kan studera hur elektronbanorna varierar när tiden det tar för en elektron att frigöras (motsvarande tunnlingstiden i den semi-

klassiska modellen) varierar inom en halv period av laserfältet. Av de banor som återvänder till ursprunget kommer man att finna att den maximalt tillåtna kinetiska energin när elektronen återvänder är $3,2U_p$. Se avsnittet ”Vidare Läsnig” för länk till ”Övningar i attosekundfysik” och deras lösningar.

Fasmatchning

Uttrycket för brytpunktsenergin kan ge oss information om den högsta möjliga överton som kan avges, men det säger oss ingenting om hur starkt eller hur ”laserlikt” det avgivna ljuset kommer att vara. Enligt den striktaste definitionen av laserljus har allt ljus samma fas och fortplantar sig i samma riktning, liknande den smala ljustrålen från en laserpekare. Inom den semiklassiska modellen kan övertonsljuset avges i valfri riktning som är vinkelrät mot laserns polarisation. På samma sätt beror det avgivna ljusets fas på laserljusets intensitet och övertonsordningen, utan någon preferens för en viss fas.



Figur 4: Fasmatchning, där ljus från många enskilda atomer läggs samman och bildar laserliknande strålning i framåtriktningen

För att förklara styrkan och de laserliknande egenskaperna hos det utsända övertonsljuset måste man beakta *fasmatchning*, det vill säga den process genom vilken ljuset som utsänds från alla atomer i gasen samlas för att bilda den laserliknande övertonsstrålen som främst utsänds i framåtriktningen, se figur 4. Perfekt fasmatchning är vanligtvis inte möjlig eftersom det finns flera olika effekter som bidrar till den lokala fasen på övertonsljuset som måste balanseras mot varandra. Som diskuterats ovan påverkar laserintensiteten övertonsljusets fas på så sätt att högre intensitet vanligtvis ger upphov till en större fASFÖRSKJUTNING. En annan fASFÖRSKJUTNING beror på att övertonsljuset har en annan frekvens än laserljuset och därför fortplantar sig genom gasen med en annan

hastighet, på samma sätt som olika färger av synligt ljus sprids till en regnbåge då de fortplantar sig genom regndroppar. Slutligen kommer atomer på olika platser inom laserns fokus att avge övertonsljus med lite olika faser. De olika bidragen till fasan kan regleras genom att ändra provets densitet och laserintensiteten, samt genom att ändra formen, storleken och placeringen av laserfokus i förhållande till gasens centrum. Årtionden av experimentellt och teoretiskt arbete har lett till att fasmatchningen nu är väl förstådd och kan skraddarsys inom ett givet experiment för att optimera det önskade resultatet för övertonsljuset, i termer av styrka, spektral bandbredd, riktning, eller en kombination av dessa.

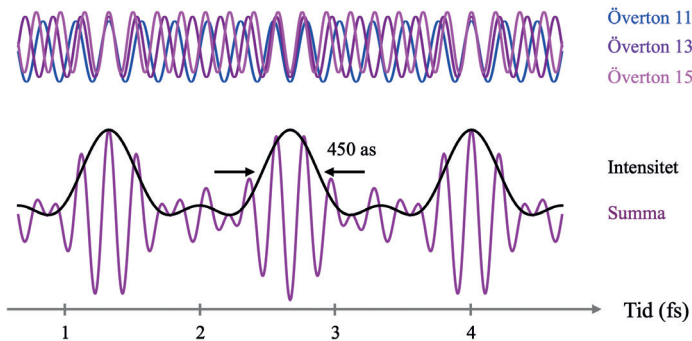
Attosekundspulser

Som också diskuteras i flera andra artiklar i denna volym av Kosmos, är generering av höga övertoner den process som ligger till grund för att skapa attosekundspulser av ljus. Detta motiverade Nobelpriset i fysik 2023, som tilldelades Pierre Agostini, Ferenc Krausz och Anne L’Huillier för ”experimentella metoder som genererar attosekundspulser av ljus för studier av elektroners dynamik i materia”. Ur ett tidsdomänperspektiv kan man förstå hur generering av övertoner kan leda till attosekundspulser genom att återigen betrakta den semiklassiska modellen. Eftersom en ljuspuls avges varje gång elektronen återförenas med kärnan, och eftersom den optiska perioden för ett infrarött laserfält endast varar några femtosekunder, är det rimligt att förvänta sig en tidsskala i attosekundsområdet för övertonsemission. Idén att den övertonsemissionen skulle bilda en serie attosekundsljuspulser föreslogs faktiskt kort efter den ursprungliga upptäckten av generering av övertoner, i slutet av 1980-talet.

Vid den tiden visste forskarna dock inte om all övertonsstrålning avges i en enda välordnad puls vid rekombinationen, eller i en serie kaotiska delpulser. Det krävdes många ytterligare experimentella och teoretiska studier för att karakterisera och kontrollera processen för generering av övertoner, innan de första experimentella demonstrationerna av attosekundpulsproduktion kunde genomföras 2001. Pierre Agostinis forskarlag visade att under rätt fasmatchningsförhållanden bildade övertonsljuset från en gas av argonatomer en serie välordnade pulser med en varaktighet på 250 attosekunder. Samma år demonstrerade Ferenc Krauszs och hans grupp produktionen av en isolerad 650 attosekundspuls, genom

att driva generering av övertoner med en mycket kort laserpuls, så att endast en halvcykel av det infraröda laserfältet var tillräckligt stark för att producera en kraftig puls av ordnat övertonsljus.

För att förstå varför fasmatchning är viktigt för att skapa attosekundpulser är det bra att tänka på processen för att generera övertoner i ett frekvensdomänperspektiv, dvs. att beakta övertonspektrumet. Från optiken vet vi att för att skapa en mycket kort ljuspuls måste vi kombinera ett mycket brett frekvensområde med liknande faser så att de kan interferera konstruktivt med varandra under ett kort tidsintervall, se figur 5. Några av de viktigaste upptäckterna under 1990-talet handlade om hur den makroskopiska fasmatchningen av strålningen från många olika atomer spridda över laserfokus också kunde användas för att styra den relativa fasen hos olika övertoner, vilket underlättade genereringen av attosekundpulser.



Figur 5: Konstruktion av en serie attosekundpulser från flera sinsemellan koherenta övertoner.

Generering av höga övertoner: en källa till ultrasnabba pulser av XUV-laserljus

Generering av höga övertoner är en extremt mångsidig källa till starkt och koherent ljus i XUV-spektralområdet, med tillämpningar inom fysik, kemi och materialvetenskap. Detta beror på att övertonsljus kan produceras i en "table-top-skala" och till en relativt låg kostnad. Dessutom kan dess egenskaper i stor utsträckning anpassas för att passa olika tillämpningar. Det finns nu hundratal laboratorier över hela världen som producerar och tillämpar övertonsljus, allt från småskaliga forskningslaboratorier som använder standardlasrar, till specialiserade system som optimerar en

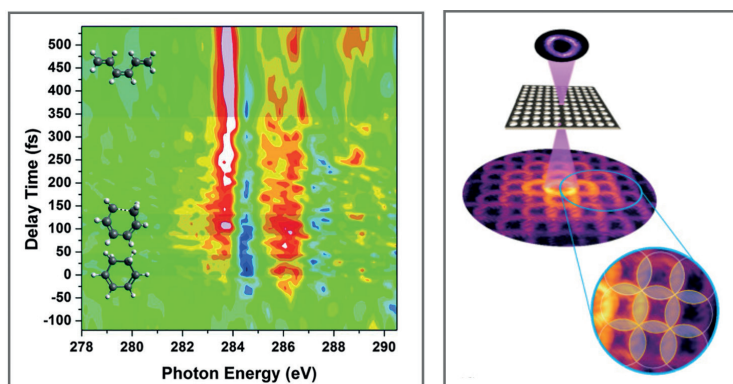
viss egenskap hos det övertonsljuset, och ända till stora användar-anläggningar som tar år att bygga och som erbjuder många olika typer av övertonsljus avsedda för olika tillämpningar.

En viktig egenskap hos övertonsljus är att det alltid avges i en puls kortare än laserpulsens, vilket gör det till en idealisk ljuskälla för mätning av ultrasnabba processer. Den korta pulsvaraktighe-ten beror på att genereringsprocessen är extremt icke-linjär. På så sätt produceras övertonsljuset endast nära laserpulsens topp, oberoende av om delpulserna i den övertonsljuspulsen har en varaktighet på attosekunder eller inte.

Den korta pulsvaraktigheten gör övertonsljuset idealiskt för ”pump-prob-experiment”, där en laserpuls initierar (pumpar) en process i ett system, vilket en stund senare följs av en andra laserpuls som ”probar” systemets status. Genom att variera tiden mellan pump- och probpulserna kan man ta en serie av probbilder och av dessa göra en animering av vad som händer i systemet efter excitationen. Varaktigheten för pump- och probpulserna måste vara kortare än den tid under vilken förändringen i systemet sker, annars blir de enskilda bilderna i filmen suddiga.

Pump-prob-tekniken används i stor utsträckning inom både kemi och materialvetenskap, till exempel för att lära sig mer om fotoinducerade kemiska reaktioner. Detta visas på vänster sida av figur 6. Till att börja med exciteras en ringformad molekyl av en pumppuls (en UV-laserpuls). Under de följande hundra femtosekunderna får denna excitation molekylen att ändra form och öppna sig till en kedjeliknande struktur. I experimentet undersöks den strukturella förändringen med en puls av övertonsljus som anländer en stund senare (kallat *Delay Time* i figurens vertikala axel). Forskarna kan följa molekylen form eftersom dess absorptionspektrum förändras beroende på formen. För detta experiment är det viktigt att det övertonsljuset har tillräckligt hög frekvens (*Photon Energy* på horisontella axeln) och tillräckligt stor bandbredd för att täcka molekylen karakteristiska absorptionslinjer. De flesta experiment drar naturligtvis också nytta av mer intensivt övertonsljus, eftersom det gör det lättare att erhålla en mätbar signal.

En annan användbar egenskap hos övertonsljus är att dess rumsliga koherensegenskaper kan anpassas genom en kombination av att manipulera de drivande laserstrålarna och fasmatching. Om man till exempel ändrar polarisationen av laserfältet, el-



Figur 6: Tillämpningar av övertonsljus. Vänster: XUV-absorptionsspektrum för en molekyl förändras när molekylens form ändras (från *Science* 356, 54 [2017]). Höger: Den rumsliga koherensen hos den ringformade övertonsstrålen underlättar avbildning av mycket små periodiska strukturer (från *Optica* 10, 1245 [2023]).

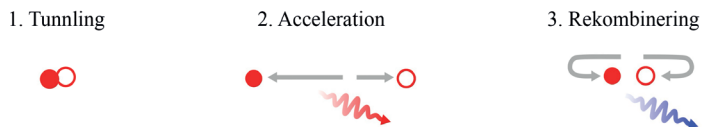
ler laserstrålens rumsliga form, ändras polarisationen och formen på strålen med övertonsljus. En tillämpning av övertonsljus för att avbilda mycket små rumsliga strukturer, liknande vad man skulle kunna göra med ett mikroskop med mycket hög upplösning, visas till höger i figur 6. En ringformad övertonsstråle passerar genom en liten periodisk struktur som lämnar ett avtryck på övertonsstrålen. Utifrån detta avtryck, och med hjälp av sin kunskap om den övertonsstrålens form och faskoherens, kan forskarna dra slutsatser om den periodiska strukturens form med högre upplösning än vad som är möjligt med mer traditionella mikroskopimetoder.

Generering av höga övertoner bortom gasfasen

Förutom dess användbarhet som källa till XUV-ljus finns det fortfarande ett stort intresse för de grundläggande aspekterna av generering av övertoner, särskilt i fasta-tillståndssystem. Såväl fasta ämnen som vätskor har betydligt högre densitet än gaser, vilket komplicerar fasmatchningen och sänker tröskeln för laserinducerade skador. Under många år ansågs därför fasta ämnen vara olämpliga som medium för generering av höga övertoner. En demonstration 2011 av övertoner upp till 25:e ordningen i en ZnO-kristall gjorde dock att ett enormt intresse väcktes för både de grundläggande och de tillämpade aspekterna av generering av övertoner i kristaller.

Många av de första studierna fokuserade på hur man kunde förstå och kontrollera genereringsprocessen. Kunde man till exempel fortfarande tänka sig generering av övertoner i termer av den semiklassiska trestegsmodell som varit så framgångsrik för system i gasfas? Tidiga experimentella resultat visade att brytpunktenergin i kristaller generellt sett är lägre än i gaser och beror på intensiteten på ett annorlunda sätt. På samma sätt fann forskarna att vissa övertoner kunde saknas, eller förekomma med mycket olika styrka, beroende på hur kristallen var orienterad i förhållande till laserpolariseringen. Till exempel observeras jämna övertonsvängningar ofta i kristaller, trots att de nästan alltid saknas i gasfasens övertonsspektra.

Dessa tidiga experimentella studier, i kombination med både konceptuella modeller och storskaliga numeriska simuleringar, har resulterat i en förståelse av kristallin generering av övertoner inom en generaliserad semiklassisk modell, se figur 7. I denna modell är första steget fortfarande tunnling av en elektron, men istället för tunnling bort från jonkärnan kan man tänka sig en elektron som tunnlar bort från det positivt laddade hålet den lämnar efter sig. I det andra steget accelereras elektronen och hålet i motsatta riktningar av laserfältet och rör sig längre ifrån varandra. I tredje steget kan sedan elektronen och hålet återförenas och deras överskottsenergi avges i form av övertonsljus, i en process liknande den i gasfasmodellen. Den största skillnaden mellan gasfas- och kristallfasmodellerna är att elektronen och hålet i det andra steget inte rör sig fritt i laserfältet, utan är starkt begränsade av det kraftlandskap som bildas av alla andra atomer i kristallen.



Figur 7: Semiklassisk modell för övertongenerering i kristaller. Ljus kan avges under både accelerations- och rekombinationsprocesserna

Atomernas rumsliga placering och symmetri inom kristallen, samt elektronernas respons på laserfältet i den begränsade miljön, avgör vilka övertoner som kan avges och vilken relativ styrka de har. Studier av det övertonsspektret för att undersöka ett materials struktur och dynamik kallas för ”övertonsspektroskopi”

och är ett område som är föremål för aktiv forskning. Övertonspektrumet är till exempel känsligt för om ett material innehåller föroreningar, om ett material tillfälligt fungerar som ledare eller isolator, och hur länge de rörliga elektronerna och hålen förblir koherenta med varandra när lasern accelererar dem inom kristallen.

Ett nytt intressant område för övertonsspektroskopi är vätskefysik. Det har att göra med att många viktiga biologiska molekyler av intresse för studier av starka fält eller ultrasnabba processer oftast förekommer i flytande form. Till skillnad från kristallina fasta ämnen har vätskor inte en välordnad periodisk struktur, utan uppvisar stora variationer i relativa avstånd och orienteringar mellan molekylerna i vätskan. Detta gör dem mer komplicerade att beskriva i teoretiska modeller, eftersom avsaknaden av periodicitet innebär att många olika typer av elektronikdynamik kan äga rum samtidigt. Experimentella studier från de senaste fem åren har visat att generering av övertoner i vätskor skiljer sig den i gaser och den i kristaller. Den semiklassiska modellen verkar dock fortfarande vara delvis relevant, även i vätskor. Inom den semiklassiska modellen för gasfasen är de elektroner som återvänder med högst energi de som har färdats längst bort från sin moderjon. Nya experimentella och teoretiska studier av generering av övertoner i vätskor tyder på att vätskans höga densitet minskar det maximala avståndet som en elektron kan färdas från sin moderjon och att detta ger en övre gräns för brytpunktsenergin för övertoner i vätskor.

Avslutning

Det slutgiltiga målet för attosekundsvetenskapen är direkt undersökning av elektronodynamik på tidsskalor omkring några få femtosekunder, eller till och med attosekunder. Detta kräver forskning på attosekundtidsskalan. Generering av högordnade övertoner i gaser har alltid varit hörnstenen i attosekundsprober på en *table-top-skala*, och utvecklingen och förfiningen av HHG som en mångsidig XUV-källa för många olika tillämpningar fortsätter att vara ett aktivt forskningsområde. På samma sätt förväntas grundläggande studier av HHG i kondenserade faser ge nya insikter om ultrasnabb dynamik i system bortom atomskalan. Studierna av generering av höga övertoner går snart in i sitt femte decennium, men aktiviteterna visar trots det inga tecken på att avta. ❖

Vidare läsning

- Geneaux, R., Marroux, H.J.B., Guggenmos, A., Neumark, D.M. & Leone, S.R. (2018). Transient absorption spectroscopy using high harmonic generation: a review of ultrafast X-ray dynamics in molecules and solids. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 377, 0463.
- Heyl, C. M. Arnold, C. L. Couairon, A. & L'Huillier, A. (2017). Introduction to macroscopic power scaling principles for high-order harmonic generation. *J. Phys. B*, 50, 013001.
- L'Huillier, A. (2024). Nobel Lecture: The route to attosecond pulses, *Rev. Mod. Phys.*, 96, 030503.
- L'Huillier, A. (2024). *Övningar i attosekundfysik och lösningar Rydbergdagarna 2024*. <https://www.nrcf.lu.se/fortbildning/konferenser/rydbergdagarna/rydbergdagarna-2024>
- Marangos, J. (2016), Development of high harmonic generation spectroscopy of organic molecules and biomolecules, *J. Phys. B*, 49, 132001.
- Yue, L. & Gaarde, M.B. (2022). Introduction to the theory of high-harmonic generation in solids: tutorial, *J. Opt. Soc. Am.*, 39, 535.