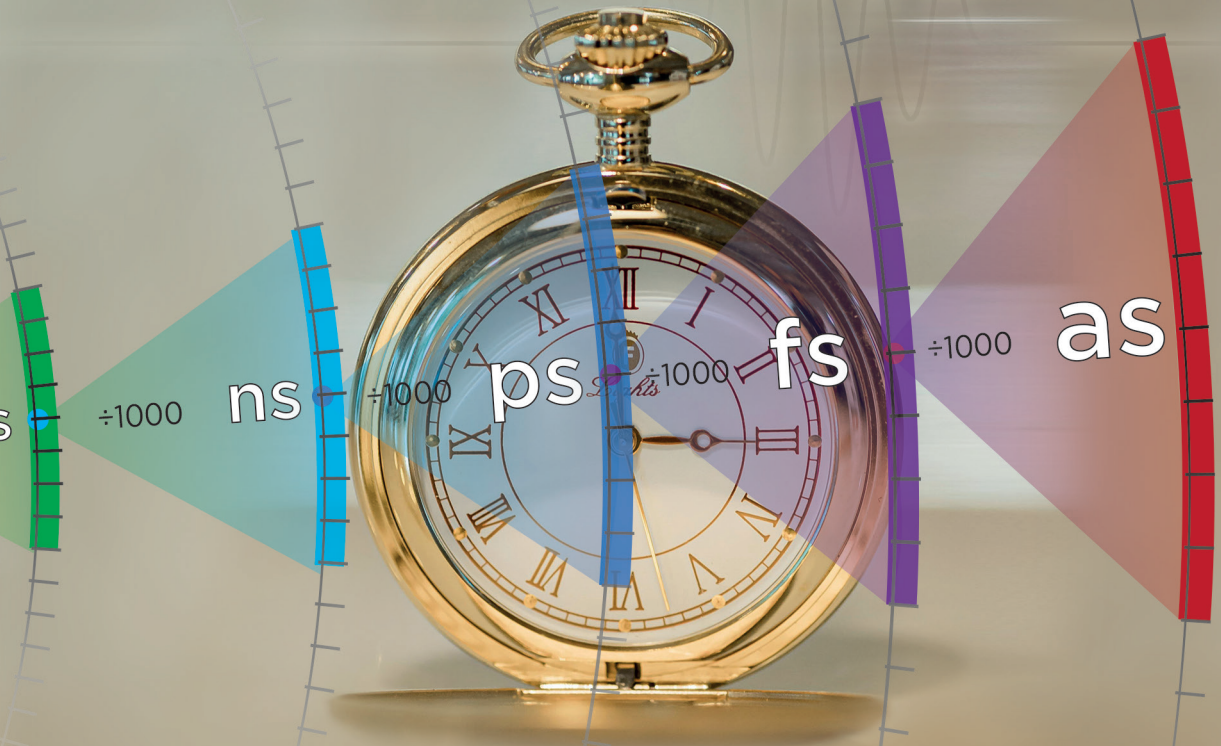


KOSMOS

attofysik

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2025



ELEKTRONDETEKTION AV OCH MED ATTOSEKUNDSPULSER

© ANDREAS HULT ROOS OCH RAIMUND FEIFEL



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

Här fördjupar sig Andreas Hult Roos och Raimund Feifel i teknologierna för att detektera fenomen så korta att de är på attosekundsskalan. De korta ljuspulserna har öppnat dörren för möjligheten att studera extremt snabba processer, som emissionen av elektroner vid fotojonisation. I denna artikel ges vi en bakgrund till problemställning, en översikt av de experimentella lösningarna och dess begränsningar.



Andreas Hult Roos

disputerade 2019 inom experimentell atom- och molekyelfysik vid Göteborgs universitet. Han var sedan Postdok och forskare vid högeffektlaseranläggningen ELI Beamlines i Prag, där han utvecklade experimentella metoder för tidsupplösta studier. Sedan 2025 är han anställd som forskningsingenjör vid Göteborgs universitets högeffektlaserfacilitet Attohallen.



Raimund Feifel

är professor i experimentell atom- och molekyelfysik vid Göteborgs universitet. Hans forskning fokuserar på jonisationsprocesser i atomer och molekyler, där han utvecklar och tillämpar flerpartikelkorrelationsmetoder i kombination med pulserade strålningskällor inom det ultravioletta och röntgenspektrala området. Experimenten görs huvudsakligen vid anläggningar i Tyskland, Frankrike och Italien, samt vid Göteborgs högeffektlaserfacilitet Attohallen.

Bilden: En flygtidsmagnetisk flaskspektrometer kopplat till ett HHG-strålrör i laserfacilitet Attohallen i Göteborg. Foto: Richard J. Squibb, Göteborgs Universitet. Se även sid 149.

Elektron-detektion av och med attosekundspulser

Bakgrund

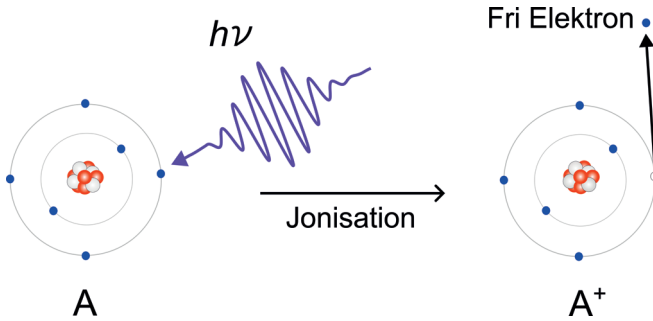
Elektroner är elementarpartiklar, vilka ofta kretsar runt atomkärnor. När de gör detta är deras konfiguration ansvarig för ett ämnes egenskaper, såsom hur de reagerar kemiskt och hur de leder elektricitet. För att förstå materien på grundläggande nivå är det mycket fördelaktigt att veta med hur mycket energi elektronerna är bundna till sina atomkärnor, hur de är fördelade i systemets tillgängliga energinivåer och hur de växelverkar dynamiskt med varandra. Men hur kan vi få inblick i denna mikroskopiska värld?

Ett viktigt steg är att studera hur materia beter sig när den träffas av ljus. Ljus har inte bara vågegenskaper — det kan också uppträda i form av små energipaket — så kallade fotoner. Denna duala våg-partikelnatur hos ljuset ligger till grund för den moderna kvantfysiken. En atom eller molekyl i gas-, vätske- eller fast fas, som utsätts för strålning med tillräckligt hög energi kan avge elektroner. Processen, som illustreras i figur 1, är den fotoelektriska effekten, som observerades 1887 av Heinrich Hertz, när han visade att ljus kunde orsaka elektriska urladdningar mellan metalltytor — så kallade elektroder.

Effekten förklarades teoretiskt 1905 av Albert Einstein i form av hans fotoelektriska lag

$$E_{\text{kin}} = h\nu - E_{\text{bind}} \quad ,$$

för vilken han belönades med Nobelpriset i fysik 1921. Här står $h\nu$ för ljuspaketets, eller fotonens, energi. h är Plancks konstant, som är en mycket liten fundamental konstant, och ν är ljusets frekvens. E_{bind} är elektronens bindningsenergi, och E_{kin} är den fria elektronens rörelseenergi. Om fotonens energi $h\nu$ är mindre än



Figur 1: Illustration av fotoelektriska effekten. Ett energipaket — en foton — absorberas av en atom. Om fotonens energi är tillräcklig hög kan det leda till att atomer joniseras och att elektroner frigörs.

E_{bind} , frigörs ingen elektron. Denna förståelse var banbrytande eftersom den visade att energiöverföring mellan ljus och materia inte är kontinuerlig. Det lade grunden för kvantmekaniken — den gren av fysiken som idag är central för förståelsen av atomers och molekylers egenskaper med tillämpningar inom t.ex. hur solceller fungerar.

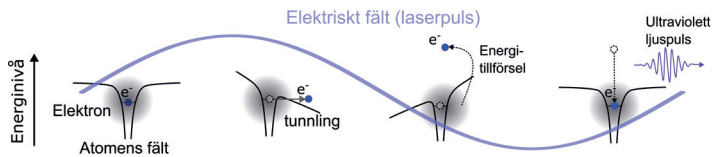
Som figur 1 visar, när en elektron, som har en negativ laddning, avlägsnas från ett neutralt system A, skapas en positivt laddad jon A^+ , som i sin tur visar på existensen av positivt laddade partiklar i atomkärnan, så kallade protoner. Den frigjorda elektronen har enligt fotoelektriska lagen en väl definierad rörelseenergi, och den bär därför med sig viktig information om vad som händer inne i atomen eller molekyl.

Det tog flera decennier tills Kai Siegbahn och hans medarbetare vid Uppsala universitet i mitten av 1950-talet lyckades med utvecklingen av en metod för att mäta ”fotoelektroners” rörelseenergi, kallad fotoelektron-spektroskopi, som uppmärksammades med Nobelpriset i fysik 1981. Om fler elektroner frigörs samtidigt från en atom eller en molekyl under inverkan av en foton, är det mycket värdefullt att analysera alla dessa tillsammans, eftersom de är sinsemellan korrelerade, och var och en för sig bär viktig delinformation om systemet. Sådana experiment kräver så kallade flerpartikelkorrelationsmetoder, vilket vi återkommer till i artikeln.

Under lång tid ansågs emission av elektroner ske ”omedel-

bart”. Tack vare nya metoder som utvecklades i början av det nya milleniet kan man idag mäta hur lång tid det faktiskt tar, dvs. man kan studera den fotoelektriska effekten tidsupplöst på attosekunds-skalan (1 attosekund = 10^{-18} sekunder). Den här utvecklingen drevs av bl.a. Anne L’Huillier vid Lunds lasercentrum, och uppmärksammades 2023 med Nobelpriset i fysik, vilket tilldelades henne tillsammans med kollegorna Pierre Agostini och Ferenc Krausz.

Som beskrivs i andra artiklar i denna volym av Kosmos skapas sådana pulser genom en process som liknar Einsteins fotoelektriska effekt. En atom utsätts för ett starkt elektriskt fält från en högeffektlaser inom det infraröda (IR) spektralområdet, och detta fält får elektronerna i atomen att svänga fram och tillbaka, som illustreras i figur 2.



Figur 2: Generering av fotoner i det extremt ultravioletta spektralområdet sker genom användning av en högeffektlaser inom det infraröda (IR) spektralområdet. Atomens elektriska fält bildar en potentialbrunn där elektronen binds till atomkärnan. Laserpulsens elektriska fält förvränger atomens potential, vilket kan frigöra en bunden elektron genom så kallad kvantmekanisk tunnling. När fältet svänger dras elektronen med och får extra energi. Elektronen kan därmed föras tillbaka till atomen och avge den lagrade energin som en ljusblint — en foton — vars våglängd ligger i det ultravioletta området. På så vis skapas övertoner av laserljuset och resultatet blir en källa till extremt kortvågigt ljus.

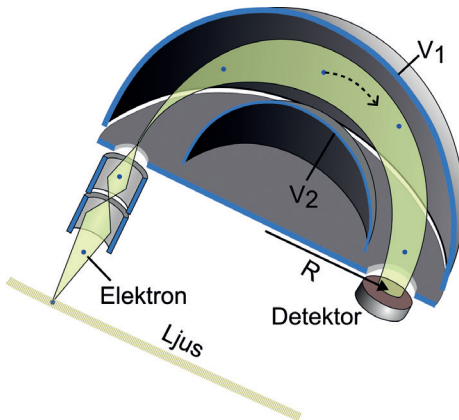
Svängningarna skapar ny strålning med högre frekvens. Detta är så kallade övertoner, alltså multiplar av den ursprungliga frekvensen. Övertonerna har samma egenskaper som laserljuset, men återfinns i det extremt ultravioletta (XUV) spektralområdet i stället för det synliga. Under vissa förhållanden samverkar ett stort antal övertoner och bildar attosekundspulser, som är ideala för att i realtid studera dynamiken av materiens snabbaste beståndsdelar — elektronerna.

Fotoelektronspektroskopi

Elektronspektroskopi kan baseras på olika tekniska lösningar för att mäta de emitterade elektronernas rörelseenergi. Man kan t.ex. använda sig av ett elektrostatiskt fält för att avböja de laddade partiklarna som funktion av deras rörelseenergi, eller man kan mäta deras flygtider över en känd sträcka.

Elektrostatiske analysatorer, särskilt hemisfäriska spegelanalysatorer, som utvecklades av Kai Siegbahn och medarbetare, separerar elektroner baserat på deras rörelseenergi i ett elektrostatiskt fält som de försöker passera för att nå en detektor. Elektronernas rörelseenergi bestäms i detta fall av styrkan på det pålagda elektriska fältet, vilket i praktiken kan ändras med mycket hög noggrannhet över ett visst spänningsintervall. På detta sätt kan idag mycket noggranna energimätningar uppnås, men där insamlingseffekten av elektroner oftast begränsas till en bråkdel av rymdvinkeln på 4π .

Figur 3 visar schematiskt en uppställning för konventionell fotoelektronspektroskopi under användning av en elektrostatiske energianalysator för uppmätning av elektronernas rörelseenergi. Den typen av elektronspektrometer är idag mycket populär på synkrotronljusanläggningar, såsom MAX-IV i Lund, bl.a. för kemisk analys av material.



Figur 3: Illustration av en hemisfärisk elektrostatiske fotoelektronspektrometer. En spänning mellan V_1 och V_2 skapar ett elektriskt fält inne i hemisfäriska spegelanalysatorn. Elektronernas olika hastigheter gör att de träffar detektorn vid olika radier R .

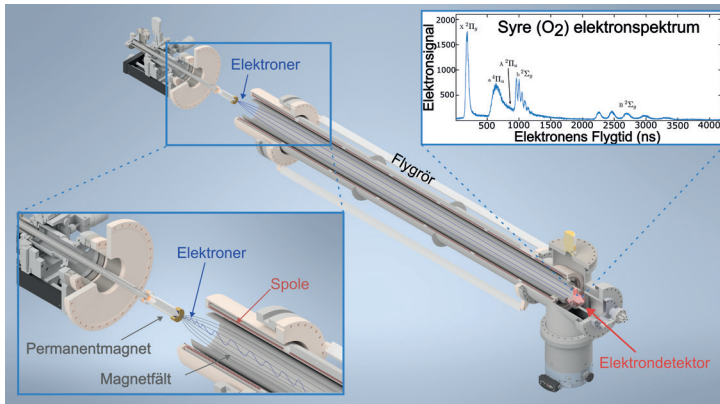
I tidiga studier som involverade övertonsgenerering användes en sådan elektrostatisk hemisfärisk elektronanalysator till tidsupplösta pump-prob-fotojonisationsexperiment¹ på molekyler vid Lunds Lasercenter, där den ultrasnabba dissociationen av högt exciterade elektroniska tillstånd var av främsta intresse. Med hjälp av tidsupplöst fotoelektronspektroskopi kunde Anne L’Huillier och medarbetare följa tidsutvecklingen av ultrasnabba dynamiska processer, t.ex. i acetylen. Experimenten var dock mycket utmanande, delvis på grund av den låga detektionseffektiviteten hos denna typ av elektronspektrometer. Därför kom man i fortsättningen att i stället satsa på mer effektiva lösningar till elektrondetektion.

Flygtids- eller, på engelska *Time-of-flight* (TOF)-spektrometrar kräver idealt sett pulserade jonisationskällor, som t.ex. högefektslasrar, för att mäta den tid det tar för elektroner att färdas en specifik sträcka till en detektor, vilket möjliggör energibestämning baserat på elektronernas hastighet. I detta fall emitteras elektroner i korta, väl definierade, pulser och registreras av en snabb detektor för att mäta deras ankomsttider. Eftersom elektroner med högre rörelseenergi färdas snabbare indikerar en längre flygtid en lägre rörelseenergi. Den kinetiska energin kan beräknas från den uppmätta flygtiden och den kända sträckan till detektorn. Högupplösta energimätningar är också möjliga under användning av spektrometrar med långa flygsträckor, och särskilt med moderna pulserade källor och snabba detektorer.

Figur 4 visar schematiskt en typisk experimentuppställning av en så kallad magnetisk flygtidsflaskspektrometer, ett koncept som presenterades för första gången år 1983 av Pieter Kruit och Frank Read, och som används idag i många laserlaboratorier runt om i världen.

Föreställ dig en flaska gjord av osynliga magnetfält där det i ena änden finns en stark magnet som skapar ett divergent fält som gradvis övergår till ett svagare, homogent magnetfält skapat av en spole. Den resulterade formen av dessa magnetfält liknar en flaskhals — därav namnet magnetisk flaskspektrometer. Elektronerna kan, när de frigörs i en fotojonisationsprocess, åka slumpmässigt åt

¹Den första ljuspulsen — pumpen — fungerar som en startsignal: den ”pumpar” igång processen, till exempel genom att excitera elektroner eller vibrationer i en molekyl. Den andra ljuspulsen — proben — anländer en noggrant kontrollerad tid senare och ”sonderar” vad som har hänt, till exempel genom att jonisera systemet. Då tidsfördröjningen mellan de två pulserna varierar kan man följa hur systemet utvecklas i realtid — som en film på atomär nivå.



Figur 4: Illustration av en flygtidselektronspektrometer baserad på principen med magnetisk flaska. Dess huvudbeståndsdelar är en pulssad strålningskälla, såsom en högeffektlaser, en gasinläppsventil, en reflekterande permanentmagnet, en flera meter lång rak spole lindad runt flygtidsröret och en detektor.

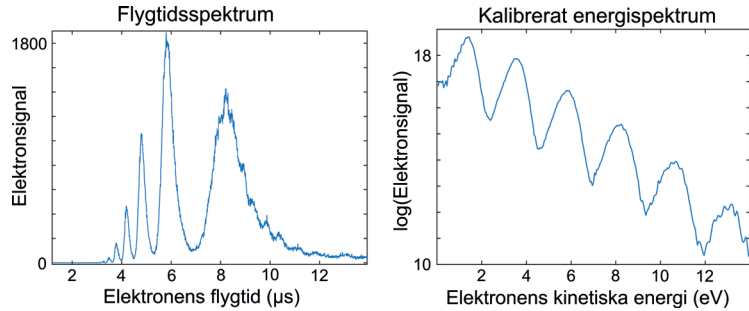
alla möjliga håll, men detta magnetfältarrangemang fungerar som en tratt för elektroner som rör sig åt fel håll, där de böjs av i det starka magnetfältet från permanentmagneten och leds av magnetfältet från spolen mot detektorn i andra änden. Permanentmagneten riktar på detta sätt alla elektroner in mot flygröret, vilket gör att praktiskt taget alla frigjorda elektroner träffar detektorn. Denna förmåga, att fånga in samtliga elektroner som frigörs från en atom eller molekyl och bestämma deras rörelseenergi, gör den här typen av elektronspektrometer mycket väl lämpad för sådana studier som här beskrivs. Genom att mäta tiden t det tar för elektronerna att färdas genom det långa röret till detektorn kan man bestämma den kinetiska energin E_{kin} på de frigjorda elektronerna med hjälp av formeln

$$t = D \sqrt{\frac{m_e}{2 E_{\text{kin}}}} \quad ,$$

där D är flygrörets längd.

Figur 5 visar som exempel ett elektronspektrum på xenon som har bestrålats med ett kraftigt laserljus med en våglängd på omkring 800 nanometer och som vi har mätt i vår egen laserfacilitet *Attohallen* i Göteborg, med hjälp av en magnetisk flaskspektrometer med hög energiupplösning. Spektrumet visas både som funktion av flygtid och kinetisk energi hos elektronerna. Under

dessa förhållanden uppträder det som på svenska kan kallas övertröskeljonisering (eng. *Above-Threshold Ionization*, ATI) — ett fenomen där det starka laserfältet successivt rycker loss elektronen från atomen i stället för att, som vid övertonsgenerering, driva den tillbaka mot atomens potential.

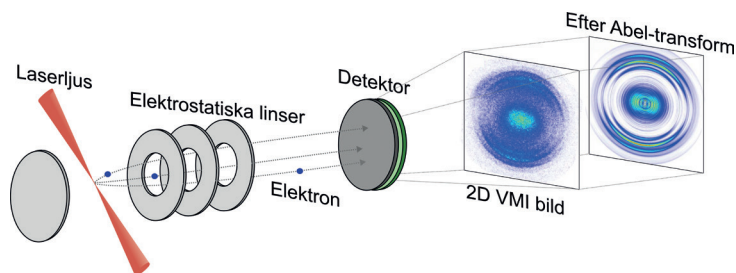


Figur 5: *Elektronpektra från högeffektslaserinducerad övertröskeljonisation (Above-Threshold Ionization, ATI) på ädelgasen xenon, både som funktion av flygtid och kinetisk energi.*

Den höga insamlingseffektiviteten hos en magnetisk flaskspektrometer är en viktig förutsättning för att avslöja hur flera elektroner, som härstammar från en och samma joniseringshändelse, är korrelerade till varandra. Detta visades 2003 av John H.D. Eland och medarbetare vid Oxford University. Dessutom kan kapaciteten hos en magnetisk flaskspektrometer utökas för att även detektera de skapade jonerna och därmed kartlägga, på atomär nivå, det fotojoniserade systemets öde som en funktion av elektronernas energetiska tillstånd. Därmed kan man få en stor mängd information om vad som händer i en atom eller molekyl från själva ögonblicket ljuset växelverkar med systemet — vilket gör metoden väl lämpad för att i synnerhet studera de oerhört snabba processerna som äger rum när attosekundsljuspulser träffar en atom eller molekyl.

Elektroner som frigörs i en jonisationsprocess slungas ut med höga hastigheter. För att få en helhetsbild av det som händer kan man även vilja mäta riktningen de har efter att de frigjorts. Ett av de verktyg som utvecklats för detta ändamål kallas på engelska för *Velocity Map Imaging* (VMI), och presenterades för första gången år 1997 av André T.J.B. Eppink och David H. Parker i Nijmegen (se figur 6). Denna experimentella metod använder elektriska

fält som styr elektronerna mot en detektor. Genom att registrera exakt var elektronerna träffar detektorn kan man räkna ut deras rörelseriktning när de frigjordes och, med hjälp av en så kallade abeltransformation även rekonstruera deras ursprungliga hastighet, om än ofta med begränsad energiupplösning. På så sätt kan man få en bild — eller rättare sagt en karta — över elektronernas rörelse, och därmed hur atomerna och molekylerna reagerade i det ögonblick de träffades av en ljuspuls.



Figur 6: Elektron-detektion med hjälp av Velocity Map Imaging, VMI-tekniken, där en elektrostatisk lins används för att projicera hastighetsvektorer hos de negativt laddade elektronerna på en tvådimensionell positionskänslig detektor. Detta skapar en "bild" av deras hastighetsfördelning. Med hjälp av en så kallad abeltransformation rekonstrueras därefter deras ursprungliga hastighet.

En annan metod för vinkelupplösta studier, som har utvecklats av Horst Schmidt-Böcking och medarbetare i Frankfurt am Main, är baserad på så kallad *Cold Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy* (COLTRIMS). COLTRIMS kan ses som en tredimensionell reaktionskamera som fångar in både elektroner och joner, samt de jonfragment som flyger isär när en molekyljon bildas av en ljuspuls. Metoden kombinerar både elektriska och magnetiska fält som styr elektronerna och fragmenten till varsin positionskänslig detektor, och mäter såväl tiden det tar för partiklarna att nå detektorn som var de träffar den. Genom att mäta tid och plats för varje träff kan man rekonstruera varje partikels rörelse i tre dimensioner med hög precision.

Både VMI och COLTRIMS-spektrometern ger kompletterande möjligheter till studier som baseras på en magnetisk flaskspektrometer. Med alla dessa flygtidsmetoder är det möjligt att studera atomers och molekylers ytterst snabba dynamik på ett mycket

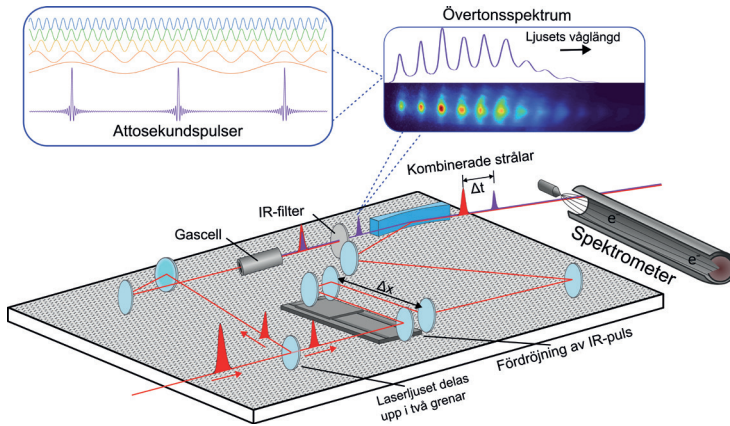
detaljerat sätt, vilket är avgörande för att förstå hur elektroner beter sig i kemiska reaktioner, och hur ljus påverkar materia redan på attosekunds nivå. I fortsättningen fokuserar vi på användningen av magnetisk flaskspektrometri, som är den teknik som författarna själva utvecklar och använder i sin forskning.

Elektron-detektion med attosekundssupplösning

Anne L’Huillier tillsammans med kollegor vid *Commissariat à l’énergie atomique et aux énergies alternatives* (CEA) i Paris-Saclay observerade 1987 för första gången alstring av övertoner genom att låta intensivt infrarött laserljus passera en stråle av ädelgasatomer och sedan detektera fotoner med hjälp av en gitterspektrometer. Experimentet visade ett stort antal högre frekvenser av det ursprungliga laserljuset, så kallade övertoner, med ungefär samma ljusstyrka. Det var ett helt oväntat resultat som till en början inte kunde förklaras. Därför fortsatte Anne att systematiskt utforska denna effekt, bland annat vid Lunds Lasercentrum.

Pierre Agostini och hans forskargrupp var också aktiva den tiden vid CEA i Paris-Saclay, med fokus på övertröskeljonisering (ATI). De fördjupade sig också i övertonsgenereringsfenomenet med användning av en magnetisk flaskspektrometer. De kom på ett knep där det extremt ultravioletta pulståget överlagrades med en fördröjd del av den ursprungliga laserpulsen, vilket gjorde det möjligt att studera fasrelationerna mellan övertonerna som träffade på ädelgasatomer som joniserades. Detta lade grunden för *Reconstruction of Attosecond Beating by Interference of Two-Photon Transitions* (RABBIT), som är en metod som idag används flitigt för att karakterisera attosekundspulståg och för att mäta attosekundstidsfördröjningar i fotojonisationsprocesser.

Vad betyder det att övertoner är i eller ur fas? Den relativa fasen mellan två, i vårt fall, ljusvågor kan illustreras med visarna på en klocka: timvisaren och minutvisaren rör sig med olika hastigheter runt urtavlan, vilket gör att vinkeln mellan dem ständigt förändras. Denna vinkel motsvarar fasskillnaden. Om visarna roterar med samma hastighet förblir vinkeln — och därmed fasen — konstant. Samma sak gäller för ljusvågor: när två vågor är i fas sammanfaller deras toppar och dalar, medan ur fas innebär att de ligger förskjutna i tid eller position. Fasskillnaden beskriver alltså hur mycket olika vågor ligger före eller efter varandra — ett avgörande begrepp för att förstå hur övertoner samverkar.

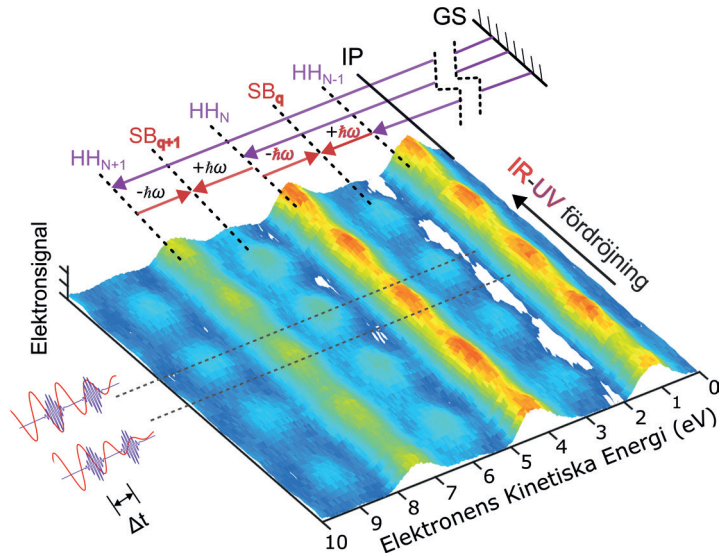


Figur 7: Illustration av mättekniken två-fotons attosekunds-RABBIT. Den infraröda (IR) laserstrålen delas i två grenar, varav den ena grenen används till övertonsgenerering i en gascell, vilket ger upphov till pulser av XUV-ljus. Dessa XUV-pulser förenas med en viss tidsfördröjning med den andra IR grenen innan båda passerar ett prov (t.ex. ädelgasatomer) där det skapas elektronvågpaket som innehåller attosekundstidsinformation och som detekteras med hjälp av en elektronspektrometer.

Som figur 7 illustrerar, bygger Pierre Agostinis teknik på att dela den ursprungliga infraröda laserstrålen i två delar, varav den ena används till övertonsgenerering i en gascell, som ger upphov till extremt ultravioletta (XUV) pulser. Dessa XUV pulser förenas med en viss tidsfördröjning med den andra delen av den infraröda laserstrålen innan båda delarna passerar ett prov (t.ex. ädelgasatomer), där det skapas elektronvågpaket som detekteras med hjälp av en elektronspektrometer, t.ex. en magnetisk flygtidsflaskspektrometer. XUV-pulserna och IR-pulserna samverkar genom så kallade tvåfotonövergångar och bildar elektronvågpaket, som interfererar med varandra, vilket ger upphov till karakteristiska intensitetsvariationer i så kallade sidband (SB), som ligger mellan signalen av varje separat överton i elektronspektret.

Figur 8 visar ett exempel på detta baserat på resultat som har tagits fram i Attohallen i Göteborg. När XUV-pulserna överlappar i rum och tid med vågtopparna och dalarna från IR-pulsen får man de karakteristiska intensitetsvariationerna i det tvådimensionella elektronspektret från pump-prob mätningen. Sidbanden uppstår när en elektron från en viss överton antingen får mer (+)

eller förlorar ($-$) energi motsvarande en IR-foton och hamnar på en energi motsvarande sidband SB_q eller SB_{q+1} .

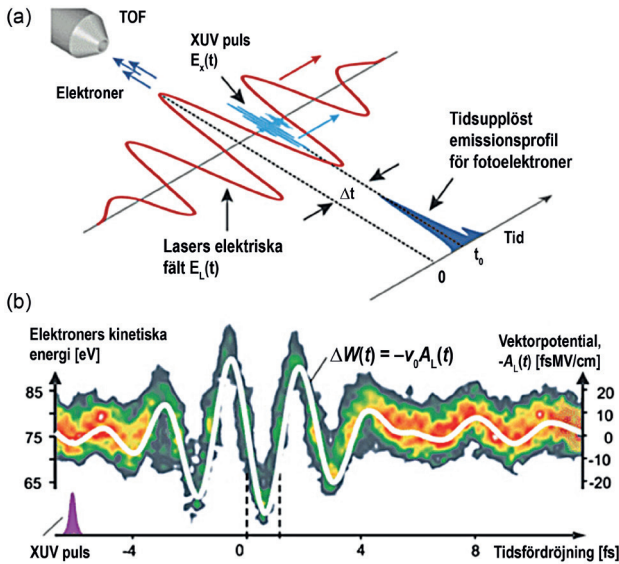


Figur 8: RABBIT-interferogram på argon. De karakteristiska sidbanden (SB) uppstår när vågtopparna och dalarna från IR-pulsen överlappar med XUV-pulserna från övertonerna (HH).

Genom att analysera dessa intensitetsvariationer som en funktion av tidsfördröjningen kan man bestämma den relativa fasen och den tidsmässiga strukturen hos attosekundspulserna. Med denna teknik kunde Pierre Agostini och kollegor bestämma pulsens längd i tåget, där de upptäckte att varje enskild puls var så kort som 250 attosekunder, precis som även vår egen mätning har resulterat i.

Ungefär samtidigt utvecklade Ferenc Krausz och hans forskargrupp i Wien (numera i München) en teknik för att isolera en enskild attosekundspuls. Till en början lyckades de generera sådana isolerade pulser med en längd på 650 attosekunder, som de sedan använde för att följa och analysera elektroners rörelse när de frigjordes från sina atomer i form av vad som idag kallas för attosekunds-streaking-spektroskopi, som är en annan metod för att mäta ultrakorta ljuspulser och elektronernas rörelser i realtid. Den bygger på att en attosekundspuls i det extremt ultravioletta området slår loss elektroner från atomer eller molekyler. Samti-

dig används en laserpuls i det infraröda spektralområdet, som är noggrant synkroniserad och bara varar några få svängningar. Denna IR-puls knuffar på de frigjorda elektronerna och ändrar deras hastighet beroende på exakt när de lämnar atomen. Genom att mäta hur mycket energi elektronerna får vid olika tidsfördröjningar mellan de två ljuspulsarna kan man, som figur 9 visar schematiskt, rekonstruera både den exakta tidsformen hos attosekundspulsen och detaljer om elektronens rörelse i det ögonblick den frigörs.



Figur 9: (a) Principen för ett attosekunds-streaking-experiment, där en enskild attosekundspuls i det extremt ultravioletta (XUV) området växelverkar med atomer från en gasstråle i närvaro av en IR laserpuls med få cykler. De frigjorda fotoelektronerna upplever en förändring av sina ursprungliga hastigheter som är proportionell mot laserfältets potential vid tidpunkten för emissionen. (b) Resultaten leder till ett så kallat streaking-spektrogram — ett slags ”filmremsa” av elektronernas kinetiska energier för olika tidsfördröjningar mellan de två ljuspulsarna. Genom att analysera detta mönster kan man återskapa både formen och tidsschemat hos laserfältet, nästan som att rita upp vågformen i realtid.

Tidsfördröjning vid elektronemission

Idén att en så kallad tidsfördröjning vid elektronemission kan finnas går tillbaka till ett koncept som Eugene Wigner introducerade

1955, med sin teori om spridningsfördröjningen. Han använde det för att beskriva hur en våg, när den växelverkar med ett kraftfält eller en potential, kan få en fasförskjutning och därmed uppvisa en liten tidsfördröjning i sitt förlopp.

Wigners koncept om spridningsfördröjning överfördes senare till atomär fotojonisation, där det beskriver hur lång tid som förflyter mellan det ögonblick då en atom absorberar en foton och det då den frigjorda elektronen verkligen lämnar atomen. Fördröjningen bestäms genom att analysera den fas som elektronens vågpaket får både när det föds och medan det rör sig ut från atomen.

De första direkta mätningarna av hur lång tid det tar innan en elektron lämnar en atom efter att ha träffats av ljus gjordes omkring år 2010 av två forskargrupper oberoende av varandra. Ferenc Krausz's grupp använde sig av isolerade extremt korta ljuspulser, var och en bara några hundra attosekunder lång. Som figur 9 illustrerar, genom att kombinera dessa pulser med ett synkroniserat infrarött laserfält kunde de ”*streaka*” — alltså tidsstämpla — de elektroner som frigjordes. Resultatet visade en tydlig skillnad på ungefär 21 attosekunder mellan elektroner som kom från olika energinivåer (2s och 2p) i neonatomer. Det var första gången man kunde visa att elektroner från samma atom inte alltid lämnar den exakt samtidigt när den träffas av ljus.

Anne L’Huilliers grupp använde sig i stället av RABBIT-tekniken för att få fram samma typ av information i fotojonisation av 3s- och 3p-skalen i argon. Denna metod gav mycket noggranna, kompletterande data om hur emissionstiden varierar med elektronernas energi. I synnerhet identifierade de två bidrag till de uppmätta tidsfördröjningarna: Wigner-tidsfördröjningen och en fördröjning som är inherent i själva mätprocessen, orsakad av kopplingen mellan det infraröda laserfältet och den joniska delen av systemet som joniseras.

Dessa banbrytande experiment förändrade vår syn på fotojonisationen. Man började inse att själva ”ögonblicket” då en elektron lämnar atomen kan bero på finstämda kvantdynamiska effekter, varav mycket kvarstår att utreda: hur elektronerna samverkar, hur de sprids i atomens potential och hur energin fördelas. Fotoelektriska effekten, som Albert Einstein beskrev så enkelt 1905, fick därmed en helt ny dimension — en tidsupplöst kvantprocess.

Innan vi går vidare vill vi nämna att inte bara tidsupplösningen, men även den spektrala upplösningen spelar en viktig roll i

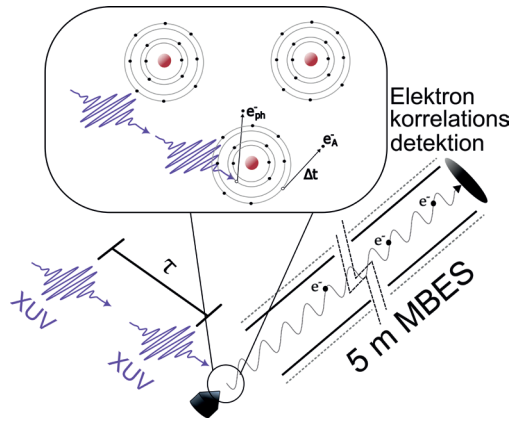
attosekundsexperiment. Det visades nyligen i ett försök där man återgick till originalarbetet av Schultze och kollegor, men nu med en högupplösande magnetisk flaskspektrometer från Göteborg installerad vid Lund Laser Center. I denna studie mättes fotojonisationsfördröjningarna i neonatomer på nytt med den interferometrisk RABBIT-metoden, som kan kombinera mycket hög tids- och spektralupplösning. Tack vare detta kunde Anne L'Huilliers grupp i samarbete med Göteborg och teori från Stockholm särskilja den direkta jonisationen från jonisation med så kallad *shake-up* — en process där en andra elektron lämnas kvar i ett exciterat tillstånd. Resultaten visade utmärkt överensstämmelse med teoretiska beräkningar och löste därmed en långvarig gåta som hade väckts av de ursprungliga experimenten.

Framtiden

Attosekundsvetenskap är ett modernt och snabbt framväxande forskningsfält. Den korta pulslängden och de utmärkta koherensegenskaperna hos övertonerna gör dem till ett fantastiskt verktyg för att undersöka dynamiken hos elektroner, som är de snabbast rörliga beståndsdelarna i vanlig materia. Eftersom det är elektronerna som binder samman atomer till molekyler, vätskor och fasta ämnen, och som är bärare av laddning och energi i kondenserade system, är förståelsen av — och i förlängningen kontrollen över — deras dynamik en av dagens stora vetenskapliga utmaningar.

Attosekundsvetenskapen har nu mognat så pass att forskningen inom området har gått från källutveckling och de första demonstrationsexperimenten till nya, mer avancerade experiment. I dessa ingår t.ex. studier i realtid av flerелеktronutsläpp från atomer och molekyler, något som illustreras schematiskt i figur 10 och som nu möjliggörs tack vare de tillgängliga experimentella verktygen där flerpartikelkorrelationsmätmetoder baserade t.ex. på en magnetisk flaskspektrometer kommer vara centrala.

Nya teoretiska förutsägelser om t.ex. dubbelt elektronutsläpp drivet av attosekundspulser ligger nu inom räckhåll för dagens experimentella metoder, som inte enbart ska fokusera på attosekundstidskalan utan även täcka in femtosekundstidskalan. Några anmärkningsvärda framsteg har gjorts inom avancerad fokusering av XUV-strålning för att kunna uppnå nödvändiga intensiteter för attosekundspulser skapade med övertonsalstring. Med ett så kallat Wolter-fokuseringsoptiksystem kan fokalpunkter på



Figur 10: Illustration av XUV-pump XUV-prob flerelektronemissions-experiment som ett steg mot att kunna kontrollera ultrasnabba elektronrörelser i atomer och molekyler

bara några få kvadratmikrometer nu uppnås, vilket är ett viktigt steg mot att nå den icke-linjära växelverkanregimen med övertonsstrålning. På femtosekundstidskalan förutspår teorin att attosekundsexperiment med XUV-pump och-XUV prob kan kartlägga grunderna i energifördelningen vid dubbeljonisation samt nya interferensfenomen. På attosekundstidskalan kan värdefull information erhållas om koherent vågpaketsdynamik från korrelationsdata mellan fotoelektroner, så kallade Augerelektroner och joner. Samtidigt börjar teorin för tidsupplöst tvåfoton-dubbeljonisation också utvidgas mot mer komplexa kvantsystem, där noggrannheten i mätningar av flerelektronatomer öppnar vägen för tillämpningar på molekylära system med hjälp av nyligen implementerade metoder för molekylär enkeljonisation.

Genom att implementera XUV-pump och XUV-prob är det möjligt att nå elektroner i inre skal med hjälp av högre fotonenergies, i kontrast till de mer vanliga attosekundsexperimenten med XUV-pump och NIR-prob. För närvarande finns inget laboratorium i världen som både har kapaciteten att utföra attosekundsexperiment enbart med XUV och samtidig högupplöst elektronkorrelationsspektrometri, vilket kräver ett avancerat högeffektlastersystem i kombination med kapaciteten hos en högupplösande flerpartikelkorrelationsspektrometer med hög detektionseffektivitet.

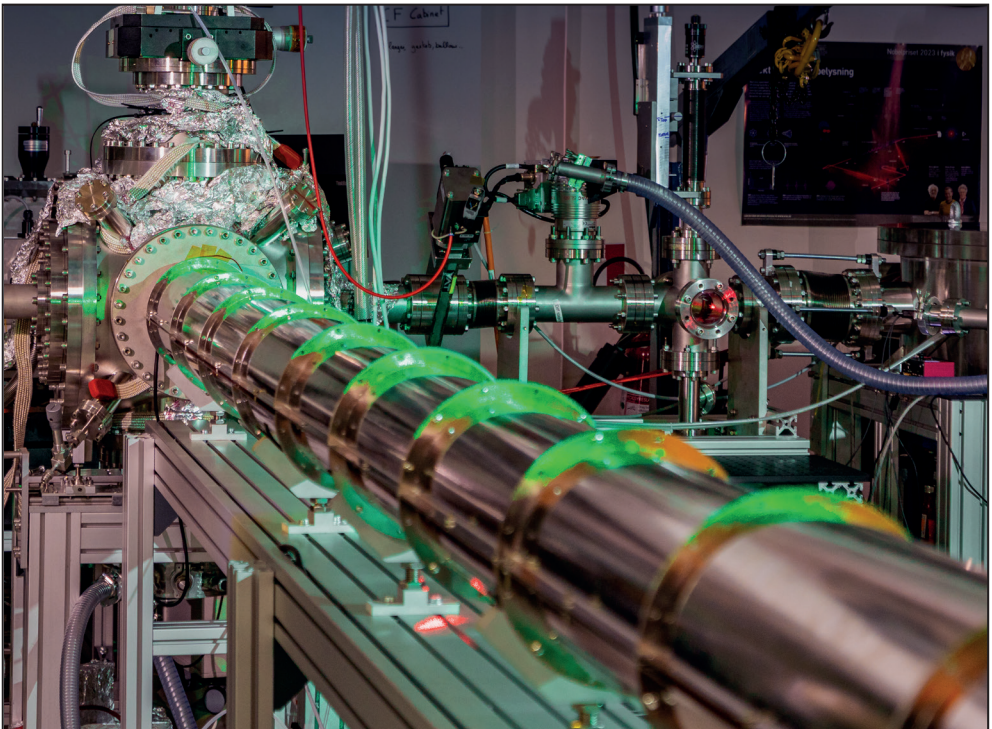
Ett annat, nästan helt utforskat område, är attosekundskemi. Denna länge efterlängtrade dröm inom forskningen, helst med elementkänslighet, är nu inom räckhåll tack vare nya attosekundskällor (som utvecklas t.ex. i ett nära samarbete mellan Lunds lasercentrum, Umeå universitet och Göteborgs universitet), i kombination med möjligheten att isolera enskilda attosekundspulser, tekniker med XUV-pump och XUV-prob, avancerad korrelationspektroskopi med flera elektroner (joner) och teoretisk modellering. Målet är att studera, förstå och till och med kunna kontrollera ultrasnabba elektronrörelser, som sker på sub-femtosekunds nivå, i molekyler som är viktiga inom biologi och medicin. Sådana processer förekommer i en rad olika vetenskapliga sammanhang, såsom i plasma, vätskelösningar och gaser, och de intar en nyckelroll för kemiska reaktioners förlopp. Några av dagens mest spännande frågor i det avseende är:

- Hur snabbt sker den kvantmekaniska elektronrelaxationen när ett innerskalshål bildas i atomer?
- Hur påverkas laddningsrörelser i molekyler av den kemiska omgivningen?
- Hur förändras lokaliseringen av innerskalshål i symmetriska molekyler över tid?

Vi vill avsluta med att notera att det även skett en betydande utveckling inom attosekundsvetenskap i spektralområdena XUV, mjukröntgen och hårdröntgen vid användarfaciliteter såsom fria elektronlaseranläggningar, där attosekundspulsgenerering har demonstrerats och flera pump-prob-experiment nyligen rapporterats. Detta är en spännande utveckling som kommer att ligga till grund för experiment vid de större forskningsanläggningarna i världen. Det inbegriper fria elektronlasrar och även EU-finansierad laserinfrastruktur (ELI ERIC), vilket kommer att leda till kompletterande resultat från laserlaboratorier runt om i världen. ❖

Vidare läsning

- Dörner, R., Mergel, V., Jagutzki, O., Spielberger, L., Ullrich, J., Moshhammer, R. & Schmidt-Böcking, H. (2000). Cold Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy: a ‘momentum microscope’ to view atomic collision dynamics. *Phys. Rep.* 330, 95.
- Eppink, A.T.J.B. & Parker, D.H. (1997). Velocity map imaging of ions and electrons using electrostatic lenses: Application in photoelectron and photofragment ion imaging of molecular oxygen. *Rev. Sci. Instrum.* 68, 3477.
- Feifel, R. & Karlsson, L. (2007). Spektroskopi på två elektroner, *Kosmos 2007*, 119–140.
- Krausz, F. & Ivanov, M. (2009). Attosecond physics. *Rev. Mod. Phys.* 81, 163.



Vinjettbilden från sid 132 i sin helhet.