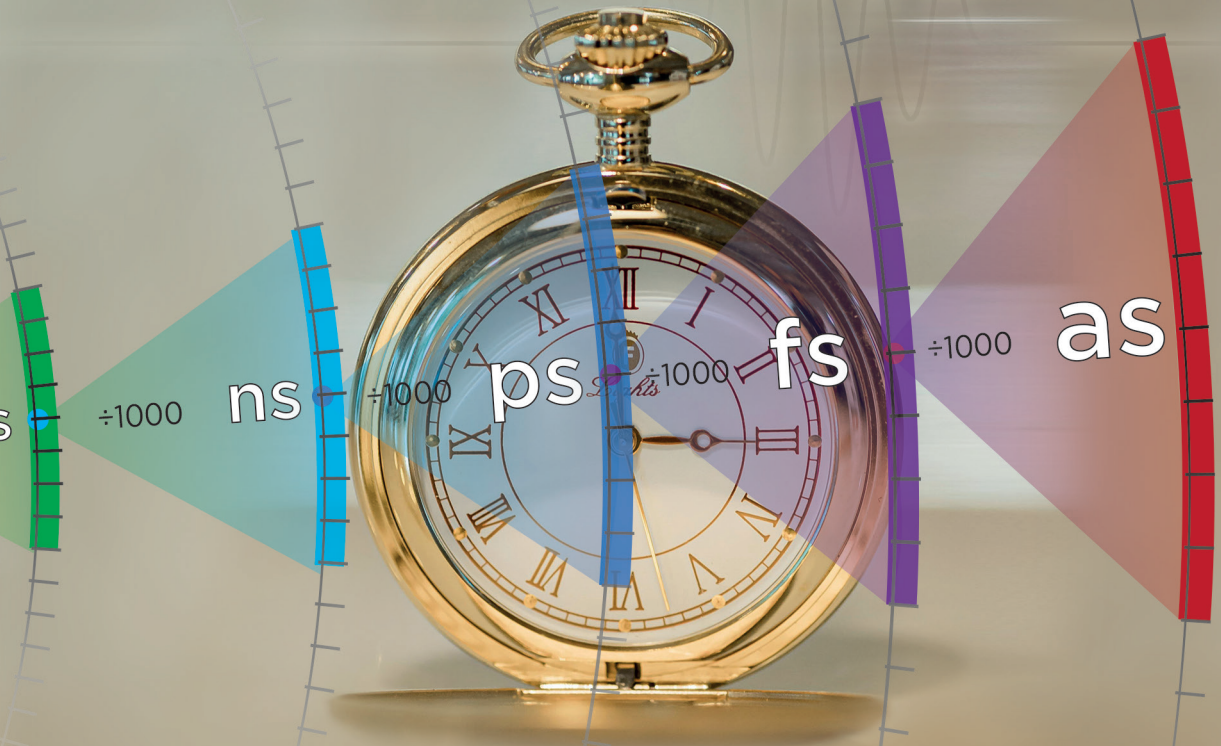


# KOSMOS

## attofysik

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2025



### ATTOSEKUNDPULSER AV LJUS: HISTORISK BAKGRUND

© ANNE L'HUILLIER



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



### Anne L'Huillier

är en fransk/svensk forskare som började karriären vid Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives i Saclay, Frankrike, som doktorand och sedan forskare fram till 1995. Hon var postdoktor vid Chalmers tekniska högskola 1986, vid University of Southern California 1988 och gästforskare vid Lawrence Livermore National Laboratory 1993. Hon flyttade till Lund 1995 och blev professor 1997. År 2023 tilldelades hon Nobelpriset i fysik tillsammans med Pierre Agostini och Ferenc Krausz "för experimentella metoder som genererar attosekundpulser av ljus för att studera elektronodynamik i materia".



**Temat för årets Kosmos har föranletts av Nobelpriset i fysik 2024 till Anne L'Huillier, och av forskning som inspirerats av hennes arbete. Inget kan då vara naturligare än att inleda volymen med Annes egna ord.**

*Bilden: Anne L'Huillier, Nobelpristagare och pionjär inom attofysik, här i ett höstligt Lund.*

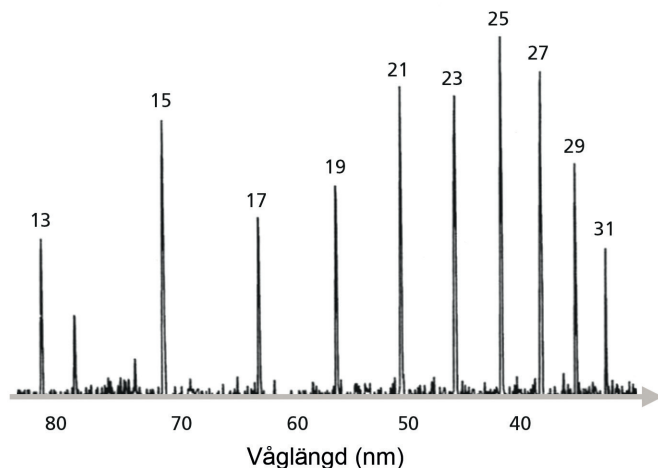
# Attosekundpulser av ljus: historisk bakgrund

Min forskarutbildning, i Frankrike i början av 80 talet, handlade om studier av atomer som utsätts för ett starkt laserfält. En naturlig förlängning av detta arbete var att detektera fluorescensen hos exciterade atomer eller joner. I slutet av 80-talet, vid Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, Saclay, Frankrike, förberedde vi ett experiment för att observera denna fluorescens. Vi såg inte mycket fluorescensljus, men i stället höga övertoner av laserljuset. Figur 1 visar ett av de första spektra som erhöles i argongas. Topparna motsvarar övertoner av udda ordning, med en frekvens lika med en udda multipel av laserfrekvensen, från den 13:e till den 31:a. Övertonsstrålningen emitterades i en smal kon riktad rakt framåt, i laserriktningen. Även övertoner från tredje till 11:e ordningen emitterades, även om de inte syns i figur 1.

Intensitetsfördelningen av dessa höga övertoner visade ett typiskt beteende, till att börja med gradvis avtagande för de första ordningarna, följt av en plåtå där alla övertoner har ungefär samma intensitet, upp till en gräns vid den 31:a ordningen. Att så många höga övertoner hade jämförbara intensiteter var oväntat och samtidigt spännande. Övertonerna befann sig i det extrema ultravioletta området av det elektromagnetiska spektret, med fotonenergier på flera tiotals elektronvolt.

Fenomenen liknar övertoner som produceras av vissa musikinstrument, till exempel en fiol. I båda fallen har vi en stark växelverkan, mellan en stråke och en sträng, eller mellan ett laserfält och atomer, vilket resulterar i många övertoner. I det ena fallet talar vi naturligtvis om ljudvågor, i det andra om ljusvågor.

Två villkor krävs för generering av höga övertoner: de flesta atomer i provet måste generera dessa övertoner och för varje övertonsfrekvens måste ljuset som genereras av olika atomer i mediet adderas i fas. Detta kallas fasmatchning.



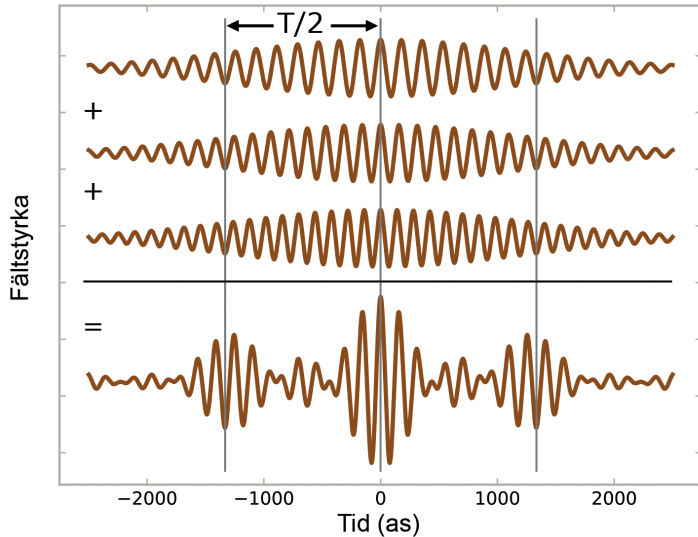
Figur 1: Experimentellt övertonsspektrum erhållet i argongas. Varje topp motsvarar en överton. Siffran  $n$  anger att frekvensen är lika med  $n$  gånger laserfrekvensen. Endast udda ordningar observeras, vilket beror på växelverkans symmetri (med tillstånd från L'Huillier *Rev. Mod. Phys.* **96**, 030503 [2024]).

I början av 1990-talet gjordes framsteg inom teknologin för högeffektlasrar. Så kallad *Chirped Pulse Amplification* upptäcktes och implementerades, och ett nytt lasermaterial, titandopad safir, uppfanns. Vid Lunds universitet investerade Sune Svanberg, Anders Persson och Claes-Göran Wahlström i denna nya teknik och lät bygga ett unikt förstärkt titansafirlasersystem, med korta laserpulser, hög toppeffekt och hög repetitionsfrekvens.

Parallellt med dessa framsteg inom laserteknik, byggdes dedikerade instrument för att studera övertongenerering. Tillsammans med mina två första doktorander blev jag inbjuden att tillsammans med lundaforskarna utföra unika experiment med den nya lasern i Lund. Kombinationen av en hög repetitionsfrekvens och ett dedikerat instrument gjorde det möjligt för oss att studera generering av höga övertoner på ett helt nytt sätt. Ett par år senare återvände jag till Lunds universitet, först för en treårig lektorstjänst och sedan, från 1997, som professor.

I början av 90-talet ställdes frågan om de olika övertonerna var tidsmässigt synkroniserade, det vill säga faslåsta. Detta skulle nämligen i tidsdomänen kunna leda till tåg av extremt korta

ljuspulser, s.k. attosekundspulser. Fasläsning betyder att toppar av de olika harmoniska vågorna sammanfaller vid vissa tidpunkter (se figur 2). Om övertonerna är faslästa, interfererar de konstruktivt varje halv laserperiod, vilket leder till emission av ett tåg av ljuspulser, med en varaktighet av storleksordningen 100 as (attosekunder), dvs.  $10^{-16}$  s. Ju fler faslästa övertoner, desto kortare pulser.

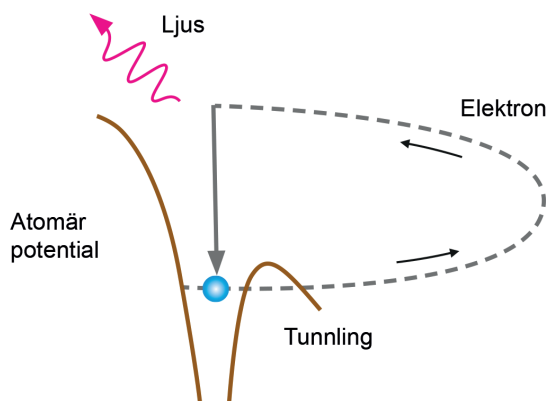


Figur 2: Illustration av fasläsning mellan övertoner, vilket leder till ett tåg av korta ljuspulser. Vågorna motsvarar övertonerna 17, 19 och 21. Vi antar att de är faslästa, det vill säga att deras maxima sammanfaller vid en viss tidpunkt. Efter en halv laserperiod sammanfaller minima, och efter ytterligare en halv laserperiod sammanfaller maxima återigen. När vågorna adderas och interfererar uppstår en serie korta ljuspulser.

För att skapa en ljuspuls med en pulslängd kortare än en femtosekund krävs dels en frekvens i det ultravioletta, eller extrema ultravioletta området, och dels att bandbredden är stor (pulsen måste innehålla många olika frekvenser). Ljuset som genereras i samverkan mellan atomer och ett starkt laserfält har här båda dessa egenskaper. Detta gav oss idén att undersöka frågan om fasläsningen av de höga övertonerna, samt att hitta metoder för mätning av korta attosekundsljuspulser.

1993 gjordes ett genombrott i den teoretiska förståelsen av

övertonsgenerering, som kallas för trestegsmodellen och som illustreras i figur 3. I ett intensivt laserfält är den atomära potentialen kraftigt skjuvad och vid en viss tidpunkt kan en elektron i grundtillståndet tunnla genom potentialbarriären som bildas på ena sidan. Den frigjorda elektronen drivs bort tills det elektriska laserfältet byter tecken. Elektronen drivs då tillbaka mot atomkärnan, och det finns en viss sannolikhet för rekombination tillbaka till grundtillståndet. Längs sin bana får elektronen kinetisk energi, och vid rekombination emitteras överskottsenergin i form av en foton med hög energi, dvs. med kort våglängd. Med tanke på alla möjliga elektronbanor skapas ett (elektron-)vågpaket och därmed en ljuspuls med flera frekvenser och kort varaktighet — hög frekvens och stor bandbredd. Denna process är helt koherent och upprepas varje halv laserperiod. Det leder till ett tåg av korta pulser i tid, och ett spektrum av höga övertoner i frekvens.

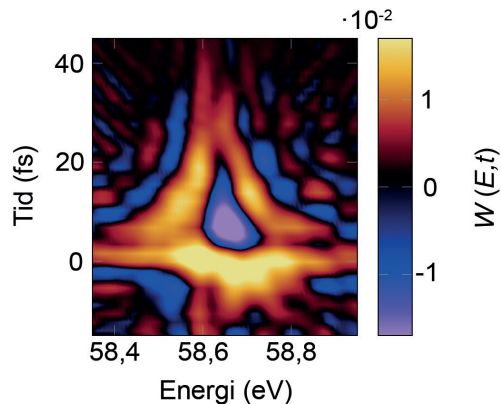


Figur 3: Illustration av trestegsmodellen som förklarar emissionen av attosekundpulser. På grund av den starka ljus-materiaväxelverkan deformeras den atomära potentialen så att en elektron kan tunnla genom den. Därefter drivs elektronen av laserfältet och återvänder med hög kinetisk energi. När elektronen faller tillbaka till grundtillståndet frigörs energin i form av en attosekundpuls (med tillstånd från *L'Huilier Rev. Mod. Phys.* **96**, 030503 [2024]).

Efter mer än ett decennium av forskning, lyckades mina två kollegor, som delade Nobelpriset med mig, mäta attosekundpulser. Pierre Agostini och medarbetare mätte attosekundpulser i ett

pulståg (se figur 2), medan Ferenc Krausz och medarbetare genererade och mätte längden av en isolerad attosekundpuls. Därmed öppnades dörren på allvar mot attosekundfysik — vetenskap där dynamiken hos atomer och molekyler studeras med hjälp av dessa extremt korta pulser.

Ett av de enklaste exemplen på elektron-dynamik är fotojonisering, där en elektron frigörs från en atom efter absorption av en foton med hög energi. Tack vare attosekundpulser kan vi nu mäta hur lång tid det tar för en elektron att utbreda sig i materialet eller i atompotentialen. Figur 4 visar en Wignerfördelning, dvs. en tids-frekvensrepresentation, av fotojonisation av helium, nära ett dubbelt exciterat tillstånd ( $2s2p$ ). Bilden visar att helium joniseras först via en direkt process, och sist via excitation av det exciterade tillståndet som sedan självjoniseras. I mitten ser vi förekomsten av starka kvantmekaniska interferenser.



Figur 4: Tidsförlopp för fotojonisation av helium nära ett dubbelt exciterat tillstånd, baserat på experimentella mätningar. Vid korta tider sker fotojonisationen främst genom direktjonisation. Därefter interfererar två olika vägar: direktjonisation och jonisation via det exciterade tillståndet. Vid längre tider dominerar fotojonisationen genom fotoexcitation följt av självjonisation (från *Eur. Phys. J. D* **76**, 112 [2022], CC-BY 4.0).

Ett annat exempel handlar om tillämpningar av höga övertoner för avbildning. Moderna litografitekniker inom halvledarindustrin, baseras på belysning vid 13,5 nm med strukturdimensioner mindre än 10 nm. De kompletteras av avancerade mät- och diagnostiktekniker för att fortlöpande kontrollera resultatet. Dessa

tekniker behöver strålningskällor med hög ljusstyrka, hög rumslig koherens, stor bandbredd och en central våglängd i XUV-området. Höga övertoner, som diskuterats ovan, har samtidigt alla dessa egenskaper. De har därför börjat användas för avancerad diagnostik inom halvledarindustrin.

Avslutningsvis vill jag tacka alla mina kollegor som deltagit i den här forskningen. ❖

## Vidare läsning

Agostini, P. (2024). Nobel Lecture: Genesis and applications of attosecond pulse trains, *Rev. Mod. Phys.*, 96, 030501.

Krausz, F. (2024). Nobel Lecture: Sub-atomic motions, *Rev. Mod. Phys.*, 96, 030502.

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>

