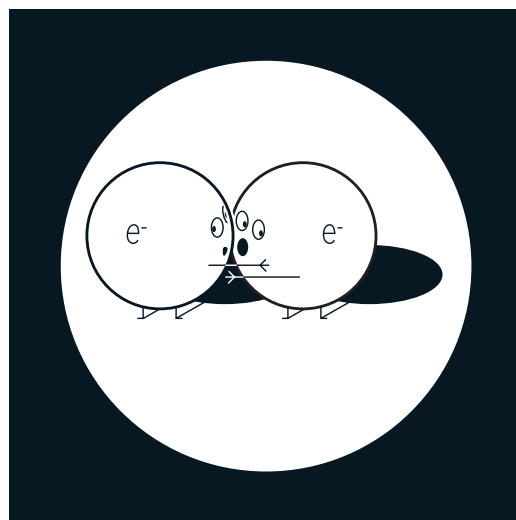


## Elektroner i blyxtbelysning

Med sina experiment har årets pristagare skapat ljusblixtar som är tillräckligt korta för att kunna fånga ögonblicksbilder av elektroners extremt snabba rörelser. **Anne L'Huillier** hittade en ny effekt av laserljus som samverkar med atomerna i en gas. **Pierre Agostini** och **Ferenc Krausz** demonstrerade att denna effekt kunde användas för att skapa kortare ljuspulser än som någonsin tidigare varit möjligt.

En liten kolibri kan slå med vingarna 80 gånger per sekund. Vi kan bara uppfatta det som ett surrande ljud och en diffus och suddig rörelse. För mänskliga sinnen flyter snabba skeenden ihop, och riktigt korta händelser blir omöjliga att uppfatta. Vi behöver använda oss av olika tekniska knep för att fånga och avbilda händelser som går snabbare än så.

Med höghastighetsfotografering och stroboskopicbelysning går det att fånga kortvariga fenomen och visa hur de ser ut i detalj. Ett skarpt fotografi av en kolibri i flykten kräver en exponeringstid som är mycket kortare än tiden det tar för fågeln att slå ett slag med vingarna. Ju snabbare händelse, desto snabbare måste avbildningen göras för att kunna fånga förloppet.

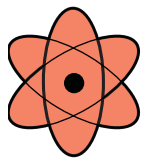


Samma princip gäller för alla metoder som används för att mäta eller avbilda snabba förlopp. Mätningen måste göras på kortare tid än det tar för det system som studeras att förändras märkbart, annars blir resultatet oskarpt. Årets pristagare har gjort experiment där de visat på ett sätt att tillverka ljusblixtar som kan lysa upp ett tillräckligt kort ögonblick för att ge en bild av vad som händer inuti atomer och molekyler.

Atomers naturliga tidsskala är ofattbart kort. Atomerna i en molekyl kan svänga och röra sig på miljondelar av en miljarddels sekund, *femtosekunder*. Sådana rörelser kan studeras med de allra kortaste pulser som går att framställa med laser. Men när hela atomer rör sig bestäms tidsskalan av de stora och tunga atomkärnorna, som är mycket tröga jämfört med de lätta och rörliga elektronerna. När elektroner rör sig inuti atomer eller molekyler går det så fort att förändringarna blir helt utsuddade på en femtosekund. I elektronernas värld förflyttas lägen och energier på mellan enstaka och några hundra *attosekunder*, där en attosekund är en miljarddels miljarddels sekund.

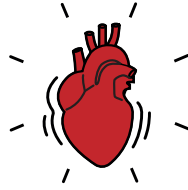
En attosekund är så kort att antalet sådana på en sekund är i samma storleksordning som antalet sekunder som gått sedan universum blev till för 13,8 miljarder år sedan. På en lite mer närliggande skala kan vi tänka oss en ljusblixt som sänds ut från ena änden av ett rum. Det hinner gå tio miljarder attosekunder innan den når den motsatta väggen.

Länge sågs en femtosekund som en gräns för hur korta ljusblixtar det över huvud taget gick att göra. För att komma åt förlopp som sker på elektronernas ofattbart korta tidsskalor räckte det inte att förbättra den teknik som redan fanns. Det behövdes något helt nytt. Årets pristagare gjorde experiment som öppnade det nya forskningsfältet *attofysik*.



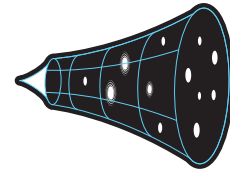
### ATTOSEKUND

1/1 000 000 000 000 000 000  
SEKUND



### HJÄRTSLAG

1 SEKUND



### UNIVERSUMS EXISTENS

1 000 000 000 000 000 000  
SEKUNDER

Elektronernas rörelser i atomer och molekyler är så snabba att tidsförloppen mäts i attosekunder. En attosekund förhåller sig till en sekund som en sekund till hela universums ålder.

## Kortare pulser med hjälp av höga övertoner

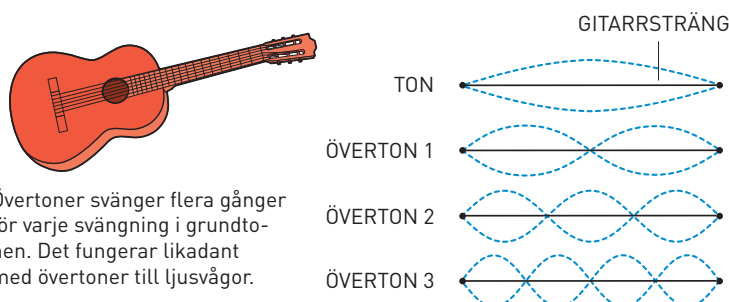
Ljus består av vågor – svängningar av elektriska och magnetiska fält som rör sig genom vakuum fortare än något annat. Vågorna kan ha olika längd, som motsvarar olika färger. Rött ljus har till exempel en våglängd på omkring 700 nanometer, en hundradel av bredden av ett hårstrå, och svänger ungefär fyrahundratrettio tusen miljarder gånger per sekund. Vi kan tänka oss att den kortaste möjliga ljuspulsen är längden på en enda period av ljusvågen, där vågen svänger upp och ner och tillbaka till utgångsläget igen. Med de våglängder som är aktuella i vanliga lasersystem kommer det i så fall aldrig att gå att komma under en femtosekund, och därför betraktades detta på 1980-talet som den yttersta gränsen för de kortaste blixtrar som går att göra.

Matematiken som beskriver vågor visar att det är möjligt att bygga upp vilken vågform som helst med tillräckligt många vågor av rätt storlekar, våglängder och förskjutning av toppar och dalar. Själva knepet bakom attosekundpulser ligger i att det går att göra kortare pulser ju fler och kortare våglängder som kombineras.

För att kunna komma åt elektronrörelser på atomskala behövs alltså tillräckligt korta ljuspulser, och för att göra dem så korta behövs en kombination av kortare vågor med ett stort antal olika våglängder.

För att få in nya våglängder i ljuset behövs mer än bara själva lasern. Nyckeln till att komma åt de kortaste ögonblick som någonsin har kunnat studeras är ett fenomen som uppstår när laserljuset passerar genom en gas. Ljuset samverkar med atomerna i gasen och ger upphov till *övertoner* – vågor som gör ett antal hela svängningar för varje svängning i den ursprungliga vågen. Vi kan jämföra med övertonerna i ett ljud, som ger det sin särskilda klang och gör att vi hör skillnad mellan samma ton från till exempel en gitarr och ett piano.

1987 kunde Anne L’Huillier tillsammans med några medarbetare i ett labb i Frankrike framställa och påvisa sådana övertoner med infrarött laserljus som skickades genom olika ädelgaser. Det infraröda



Övertoner svänger flera gånger för varje svängning i grundtonen. Det fungerar likadant med övertoner till ljusvågor.

ljuset gav upphov till fler och starkare övertoner än laser med kortare våglängder, som hade använts i tidigare experiment. I experimentet syntes ett stort antal övertoner med ungefär samma ljusstyrka.

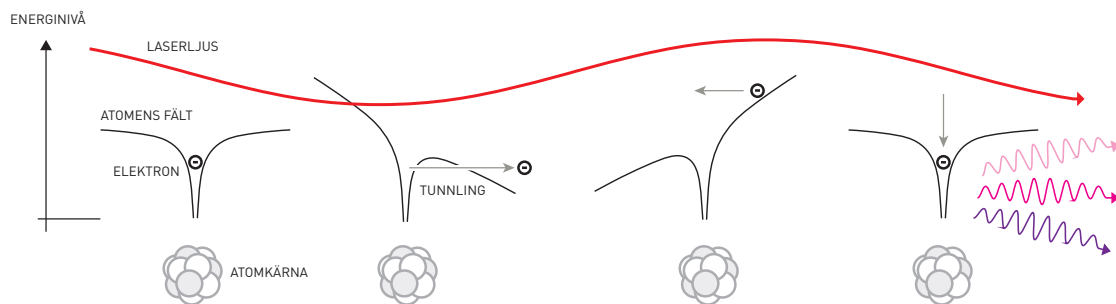
I en serie arbeten fortsatte Anne L'Huillier att utforska den här effekten under 1990-talet, bland annat på sitt nya hemuniversitet i Lund. Resultaten bidrog till den teoretiska förståelsen av fenomenet, och stakade ut vägen mot nästa experimentella genombrott.

## Elektroner på utflykt skapar övertonerna

Det som händer när laserljuset kommer in i gasen är att det påverkar gasens atomer. De elektromagnetiska svängningarna förvränger det elektriska fältet som håller fast elektronerna kring atomkärnan. Elektroner kan då smita ut från atomerna och flyga fritt. Men ljusets elektriska fält svänger hela tiden, och när det byter riktning kan en lösryckt elektron rutscha tillbaka till sin atomkärna igen. Under utflykten har den fått en hel del extra energi av laserljusets elektriska fält, och för att kunna fastna kring atomkärnan igen behöver den göra sig av med överskottsenergin i form av en ljusblinx. Det är dessa ljusblinxar från elektronerna som utgör de övertoner som visar sig i experimenten.

## Laserljus växelverkar med atomer i en gas

Experiment som skapade övertoner till laserljus ledde till upptäckten av mekanismen för hur övertonerna uppstår. Så här fungerar det.



- 1 En elektron som är bunden vid en atomkärna kan normalt inte lämna atomen. Dess energi räcker inte till för att lyfta den ur den brunn som bildas av atomens elektriska fält.
- 2 Atomens fält förvrängs när det påverkas av laserpulsen. När bara en smal barriär stänger in elektronen tillåter kvantmekaniken att den tunnlar ut och blir fri.
- 3 Den fria elektronen fortsätter att påverkas av laserfältet och får lite extra skjuts. När fältet svänger och byter riktning dras elektronen tillbaka åt det håll den kom ifrån.
- 4 För att kunna fästas vid atomkärnan igen behöver elektronen göra sig av med den extra energi den fått under utflykten. Energin avges som en ultraviolet blix, vars våglängd är knuten till laserfältets våglängd, och blir olika beroende på hur långt elektronen rört sig.

Ljusets energi hör ihop med dess våglängd. Energin i övertonerna som avges motsvarar ultraviolet ljus med kortare våglängder än det ljus som är synligt för människoögat. Eftersom energin kommer från laserljusets svängningar kommer övertone ns svängning att vara elegant proportionerlig mot våglängden i den ursprungliga laserpulsen. Resultatet av ljusets växelverkan med många olika atomer blir olika ljusvågor med en uppsättning specifika våglängder.

När övertonerna har uppstått växelverkar de med varandra. Ljuset förstärks när topparna i ljusvågorna sammanfaller. Omvänt försvagas det där toppar från en svängning sammanfaller med dalar i en annan. Vid rätt förutsättningar sammanfaller övertonerna så att det uppstår en serie pulser med ultraviolet ljus, där var och en är några hundra attosekunder lång. Fysiker förstod teorin för detta under 1990-talet, men genombrottet med att faktiskt identifiera och testa pulserna kom först 2001.

## Elektronernas värld utforskas med de kortaste ljuspulserna

När laserljus sänds genom en gas uppstår ultravioletta övertoner från atomerna i gasen. Under rätt förutsättningar kan övertonerna vara i fas. När svängningarna sammanfaller bildas koncentrerade attosekundpulser.

ÖVERTONER LÄGGS SAMMAN



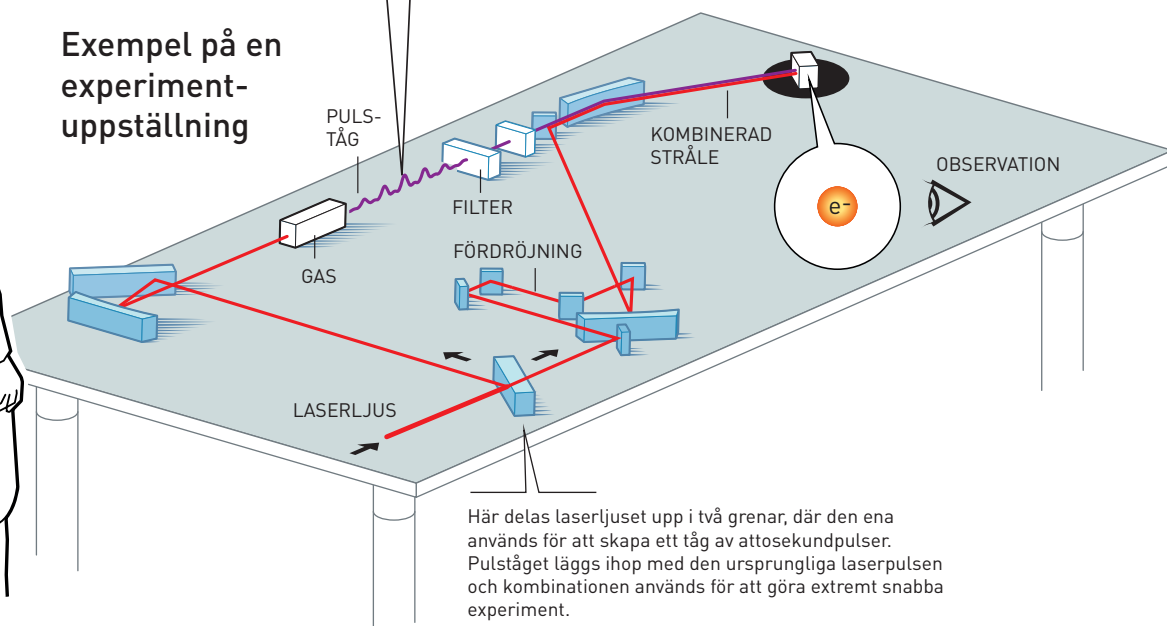
FÖRSTÄRKER ELLER FÖRSVAGAR VARANDRA



ATTOSEKUNDPULSER



### Exempel på en experiment-uppställning



Då lyckades Pierre Agostini med sin forskargrupp i Frankrike framställa och undersöka ett tåg av ljuspulser efter varandra. De använde ett särskilt knep, där de lade ihop pulståget med en fördröjd del av den ursprungliga laserpulsen, för att se hur övertonerna var i fas med varandra. Förfarandet gav dem också en mätning av längden på pulserna i tåget, och de kunde då se att varje enskild puls var bara 250 attosekunder lång.

Vid samma tid arbetade Ferenc Krausz och hans forskargrupp i Österrike med en teknik som kunde välja ut en ensam puls – som en vagn som kopplas loss ur ett tåg och växlas in på ett eget spår.

Pulsen de då lyckades isolera blev 650 attosekunder lång, och gruppen använde den för att följa och studera ett förlopp där elektroner rycktes loss från sina atomer.

Dessa experiment demonstrerade att attosekundpulser kunde observeras och mätas, och att de också kunde användas i nya experiment.

När attosekundvärlden nu har blivit tillgänglig går det att använda de korta ljusblixtarna till att studera elektroners rörelser. I dag går det att göra pulser ner till några tiotal attosekunders längd, och tekniken utvecklas hela tiden.

## Elektronernas rörelser har blivit tillgängliga

Med hjälp av attosekundpulserna går det att mäta hur lång tid det tar för en elektron att ryckas loss från en atom, och undersöka hur den tid det tar beror på hur hårt elektronen är bunden till atomkärnan. Det går också att rekonstruera hur elektronfördelningen svänger från sida till sida eller plats till plats i molekyler och material – medan det tidigare bara gick att uppfatta var de befann sig i genomsnitt.

Attosekundpulserna gör det möjligt att testa kunskapen om hur processer i materiens inre fungerar, och att identifiera olika händelser. De har använts för att utforska detaljerna i atomers och molekylers fysik. Det finns också potentiella praktiska tillämpningar inom olika områden, från elektronik till medicin.

Till exempel kan attosekundpulser användas för att knuffa till molekyler, som sedan avger en mätbar signal. Signalen från molekylerna har en särskild struktur, som en sorts fingeravtryck som avslöjar vad det är för molekyl. Det kan kanske användas till exempel inom medicinsk diagnostik.

---

## LÄS MER

Mer information om årets priser, bland annat en vetenskaplig bakgrundsartikel på engelska, finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, [www.kva.se](http://www.kva.se), och på [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org). Där kan man också titta på presskonferenser, Nobelföreläsningar och annat videomaterial. Mer information om utställningar och aktiviteter kring Nobelpriset och Ekonomipriset finns på [www.nobelprizemuseum.se](http://www.nobelprizemuseum.se).

---

## Kungl. Vetenskapsakademien har beslutat utdela Nobelpriset i fysik 2023 till

### **PIERRE AGOSTINI**

Född 1941 (82 år) i Tunis, Tunisien. Fil.dr 1968 vid Université Aix-Marseille, Frankrike. Professor vid The Ohio State University, Columbus, USA.

### **FERENC KRAUSZ**

Född 1962 (61 år) i Mór, Ungern. Fil.dr 1991 vid Technische Universität Wien, Österrike. Director vid Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching och professor vid Ludwig-Maximilians-Universität München, Tyskland.

### **ANNE L'HUILLIER**

Född 1958 (65 år) i Paris, Frankrike. Fil.dr 1986 vid Université Pierre et Marie Curie, Paris, Frankrike. Professor vid Lunds universitet, Sverige.

*”för experimentella metoder som genererar attosekundpulser av ljus för studier av elektrondynamik i materia”*

Vetenskapsredaktörer: Ulf Danielsson, Mats Larsson, Eva Olsson, Nobelkommittén för fysik  
Text: Anna Davour  
Illustrationer: Johan Jarnestad  
Redaktör: Sara Gustavsson  
©Kungl. Vetenskapsakademien