

Med ljus som verktyg

De i år belönade uppfinningarna har revolutionerat laserfysiken. Extremt små objekt och otroligt snabba processer har nu uppenbarat sig i nytt ljus. Inte bara fysiker utan även kemister, biologer och medicinare har fått precisionsinstrument att använda både i grundforskning och i tillämpningar.

Arthur Ashkin uppfann den optiska pincetten, vars ljusstrålefinngar griper tag i partiklar, atomer och molekyler. Även virus, bakterier och andra levande celler går att hålla fast, undersöka och manipulera utan att skada dem. Med den optiska pincetten skapade Ashkin helt nya möjligheter att se och påverka livets maskineri.

Gérard Mourou och Donna Strickland banade väg för de kortaste och mest intensiva laserpulser människan skapat. Tekniken de utvecklade har både öppnat för nya forskningsområden och lett till breda industriella och medicinska tillämpningar. Till exempel utförs numera miljontals ögonoperationer årligen med den vassaste av ljusstrålar.

Färdas i ljusstrålen

Arthur Ashkin hade en dröm: tänk om man kunde sätta ljusstrålar i arbete och få dem att flytta på föremål. Inte minst i kultserien Star Trek från mitten av 1960-talet kan en traktorstråle hämta hem olika objekt, till och med asteroider från rymden, utan att röra vid dem. Det låter som ren science fiction, såklart. Visserligen kan vi själva uppleva att solstrålar bär på energi – vi blir varma i solen. Men för att känna av någon liten knuff är strålningstrycket alldeles för litet. Skulle då kraften räcka till att knuffa iväg mycket små partiklar och atomer?

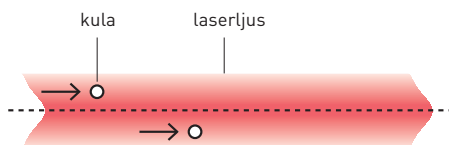
Omedelbart efter tillkomsten av den allra första lasern 1960 började Ashkin experimentera med det nya instrumentet vid Bell Laboratories utanför New York. I en laser rör sig ljusvågorna i takt, till skillnad från vanligt vitt ljus där strålarna blandas huller om buller i regnbågens alla färger och sprids åt alla håll.

Ashkin insåg att lasern skulle vara ett perfekt verktyg för att få ljusstrålar att flytta på små partiklar. Han belyste mikrometerstora genomskinliga kulor, och mycket riktigt fick han omedelbart fart på kulorna. Samtidigt överraskades Ashkin av att kulorna drogs mot mitten av strålen, där den var som mest intensiv. Förklaringen är att hur skarp en laserstråle än är, avtar dess intensitet från centrum ut mot sidorna. Därmed varierar även det strålningstryck som laserljuset utövar på partiklarna på så sätt att de trycks mot strålens mitt – strålen håller fast partiklarna i centrum.

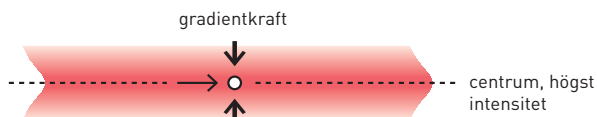
För att hålla fast partiklarna också i strålens riktning, satte Ashkin in en stark lins som fokuserade laserstrålen. Partiklarna kom då att dras mot den punkt där ljusintensiteten var som högst. En ljusfälla som kom att kallas optisk pincett var född.

Ashkin utvecklar sin ljusfälla

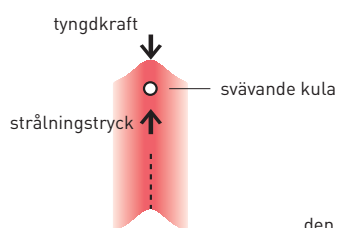
1 Små genomskinliga kulor färdas iväg när de belyses med laserljus. Hastigheten stämmer väl med Ashkins teoretiska uppskattning, vilket visar att det verkligen är strålningstrycket som knuffar fram kulorna.



2 En oväntad effekt var att en gradientkraft trycker kulorna mot strålens mittfåra, där ljuset är som mest intensivt. Det beror på att strålens intensitet avtar från centrum vilket innebär att summan av alla krafter som trycker iväg kulorna vänder dem mot mitten.



3 Ashkin får kulorna att sväva genom att vända laserstrålen uppåt. Strålningstrycket motverkar då tyngdkraften.



4 Ljusstrålen fokuseras med en lins. Så fångar ljuset partiklar och senare även levande bakterier och celler i ett optiskt pincettgrepp.

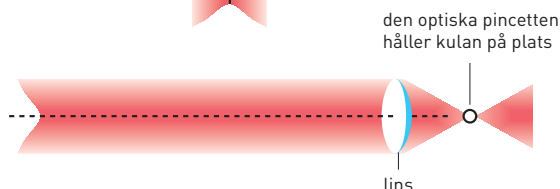


Bild 1. Ashkin skapar en ljusfälla som så småningom kom att kallas den optiska pincetten.

Levande bakterier fångade av ljus

Efter flera år och många motgångar, kunde även enstaka atomer fångas i fällan. Svårigheterna var flera. Det krävdes starkare krafter för att den optiska pincetten skulle kunna ta tag i atomerna. Dessutom satte atomernas värmerörelser en gräns. Det gällde att hitta ett sätt att bromsa atomerna och packa ihop dem till ett område mindre än punkten i slutet av denna mening. Först 1986 föll allt på plats – den optiska pincetten kunde kombineras med andra metoder att stoppa atomer för att få in dem i fällan.

Medan inbromsning av atomer blev en forskningsgren i sig, upptäckte Arthur Ashkin ett helt nytt användningsområde för sin optiska pincett – studier av biologiska system. Det var slumpen som ledde honom dit. I sin strävan att fånga allt mindre partiklar använde han prover med små mosaikvirus. När han råkade lämna sina prover öppna över natten fylldes de med ett antal stora partiklar som dessutom för runt hit och dit. I ett mikroskop upptäckte han att det var bakterier. Bakterierna inte bara simmade fritt omkring – när de kom nära laserstrålen, fastnade de i ljusfällan. Men hans gröna laserljus tog död på dem, så för att få bakterierna att överleva krävdes en svagare stråle. I den osynliga infraröda belysningen kunde de leva oskadda och föröka sig i fällan.

Följaktligen satte Ashkin en mängd olika bakterier, virus och levande celler under sin optiska lupp. Han visade att det till och med gick att nå in i cellerna utan att förstöra cellväggen.

Med den optiska pincetten öppnade Ashkin en hel värld av nya användningsområden. Ett stort genombrott var möjligheten att undersöka mekaniska egenskaper hos molekylära motorer, stora molekyler som utför livsviktigt arbete inuti cellerna. Den första att kartläggas i detalj med en optisk pincett blev motorproteinet kinesin, och dess stegvisa rörelse längs mikrotubuli, som är en del av cellskelettet.

En motormolekyl vandrar i ljusfällan

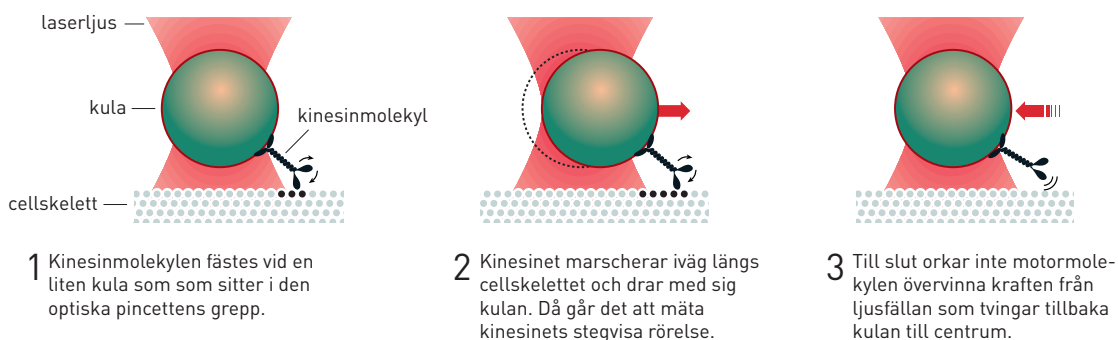


Bild 2. Den optiska pincetten kartlägger motormolekylen kinesins promenad längs cellskelettet.

Från science fiction till tillämpningar

Många andra forskare har inspirerats att anamma Ashkins metoder och förfinat dem under de senaste åren. I dag drivs utvecklingen av oräkneliga tillämpningar. Optisk pincett gör det möjligt att se, vrida, klippa, knuffa och dra utan att röra vid de undersökta objekten. Laserpincetten ingår därför som standardutrustning i många laboratorier för studier av biologiska processer, som enskilda proteiner, molekylära motorer, arvsmassans DNA eller cellernas inre liv.

Optisk holografi hör till de senaste utvecklingarna där tusentals pincetter kan användas samtidigt. Med dem kan till exempel friska blodceller skiljas från smittade, något som kan få bred tillämpning i bekämpningen av malaria.

Arthur Ashkin slutar aldrig att förbluffas över utvecklingen av sin optiska pincett, science fiction som nu blivit vår verklighet. Även den andra delen av årets pris – uppfinningen av korta högintensiva strålar – hörde länge till forskarnas uppfyllda framtidsvisioner.

Ultrakorta högintensiva strålar med ny teknik

Inspirationen kom från en populärvetenskaplig artikel som beskrev radar och dess långa radiovågor. Steget till de mycket kortare ljusvågorna var dock stort, både i teorin och i praktiken. Genombrottet beskrevs i den artikel som kom ut i december 1985 och var Donna Stricklands första vetenskapliga publikation. Hon hade anlänt från Kanada till University of Rochester i USA där hon lockades till laserfysiken med dess gröna och röda strålar som likt en julgran lyste upp laboratoriet, och inte minst av sin handledare Gérard Mourous visioner. Nu blev en av dem verklighet – tanken att förstärka korta laserpulser till nivåer utan motstycke.

Laserljus bildas genom en kedjereaktion i vilken ljusets partiklar, fotoner, frigör ytterligare fotoner. Dessa kan sändas ut i pulser. Ända sedan lasern uppfanns för snart 60 år sedan har forskare strävat efter att skapa allt intensivare pulser. I mitten av 1980-talet hade man dock nått vägs ände. För korta pulser gick det inte längre i praktiken att höja ljusintensiteten utan att förstöra förstärkarmaterialet.

CPA - chirped pulse amplification

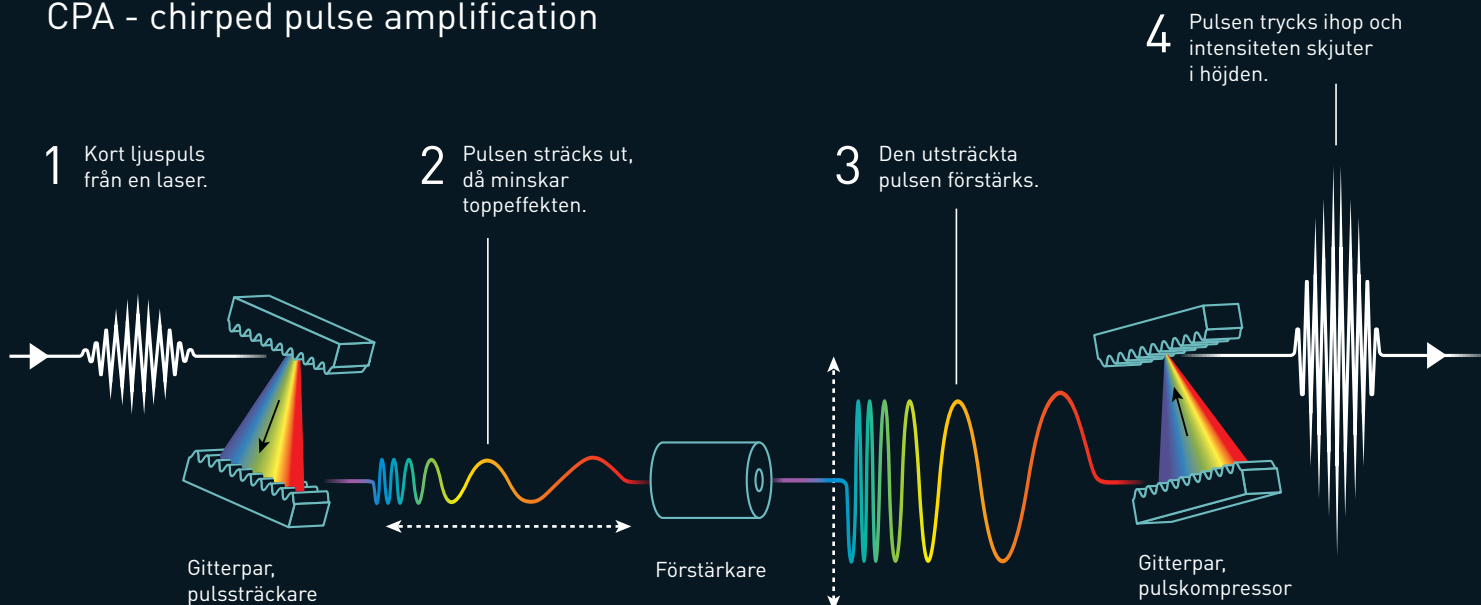


Bild 3. CPA revolutionerade lasertekniken. Den tillät att alstra mycket intensiva korta ljuspulser genom att på ett intrikat sätt undvika risken att förstöra förstärkarmaterialet. Istället för att förstärka ljuspulsen direkt, sträcks den ut först i tiden, så toppeffekten faller. Först då förstärks pulsen, och när den sedan trycks ihop samlas mer ljus på samma ställe – ljuspulsen blir extremt intensiv.

Stricklands och Mourous nya teknik, kallad CPA eller *chirped pulse amplification*, ter sig både enkel och mycket elegant. Ta en kort laserpuls, sträck ut den i tid, förstärk den och tryck ihop den igen. När en puls sträcks ut i tiden blir dess toppeffekt mycket lägre och därför kan pulsen förstärkas rejält utan att skada förstärkaren. Så trycks pulsen ihop i tiden vilket innebär att mer ljus packas ihop inom ett litet område i rummet – pulsens intensitet skjuter då i höjden.

Det tog några år innan Strickland och Mourou lyckades få alla delar att fungera ihop. Som vanligt dök svårigheterna upp i en massa både praktiska och teoretiska detaljer. Till exempel skulle pulsen sträckas ut med hjälp av en nyansskaffad 2,5 km lång fiberkabel. Men inget ljus kom ut. Någonstans i mitten var kabeln av. Efter en hel del trassel fick 1,4 km räcka. En stor utmaning var att matcha de olika stegen i apparaturen och få utsträckningen av strålen att passa ihop med hoptryckningen. Även detta löstes och 1985 kunde Strickland och Mourou för första gången bevisa att deras eleganta vision också fungerade i praktiken.

CPA-tekniken revolutionerade laserfysiken. Den blev standard för alla senare tillkomna högintensitetslaserar och en port mot helt nya områden och tillämpningar inom fysiken, kemien och medicinen. De kortaste och intensivaste laserpulserna någonsin kunde nu alstras i laboratoriet.

Världens snabbaste filmkamera

Vad behövs de intensiva ultrakorta pulserna till? Ett tidigt användningsområde var att blyxtbelysa vad som händer bland molekyler och atomer inne i den ständigt föränderliga mikrovärlden. Det går fort, så fort att det länge bara gick att beskriva med ett före och ett efter. Men med pulser så korta som en femtosekund, en miljon miljarddelar av en sekund, går det att se skeenden som tidigare verkat hända momentant.

Laserns extremt höga intensitet gör också ljuset till ett verktyg för att förändra materiens egenskaper. Till exempel kan isolerande material omvandlas till elektriskt ledande. Med de ultravassa laserstrålarna går det att med extrem precision skära eller borra hål i olika material och även i levande materia.

De kan till exempel användas till att skapa effektivare datalagring, då lagret inte bara byggs på ytan utan även i minihål borrarade på djupet i lagringsmaterialet. Teknologin används också till att tillverka kirurgiska stentar, mikrometerstora sträckmetallcylindrar som vidgar och stärker blodkärl, urinledare och andra ledningar inuti kroppen.

Användningsområdena är otaliga, och har knappast utforskats fullt ännu. Varje nytt steg innebär att forskarna får insyn i nya världar som förändrar både grundforskningen och tillämpningarna.

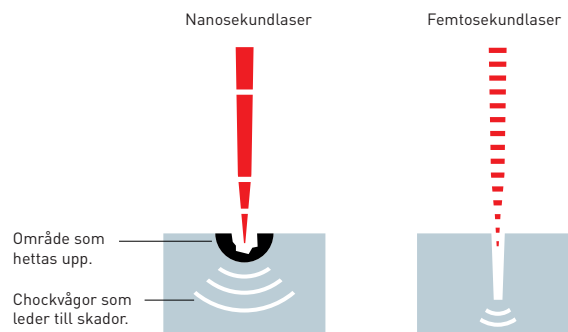


Bild 4. De korta pulserna från en femtosekundlaser (till höger) ger mindre skador i materialet än de en miljon gånger längre pulserna från en nanosekundlaser (till vänster). Idag används de ultrakorta och intensiva laserpulserna bland annat vid ögonoperationer, datalagring och tillverkning av medicinska stentar för operationer i kroppens kärl.

Ett av de nya forskningsområden som tillkommit under den senaste tiden är attosekundfysiken. Med laserpulser kortare än hundra attosekunder (en attosekund är en miljard miljarder gånger kortare än en sekund) avslöjas dramatiken i elektronernas värld. Elektronerna är kemins arbetshästar. De svarar för optiska och elektriska egenskaper hos alla material, och för de kemiska bindningarna. Nu kan dessa inte bara mätas, utan även påverkas.

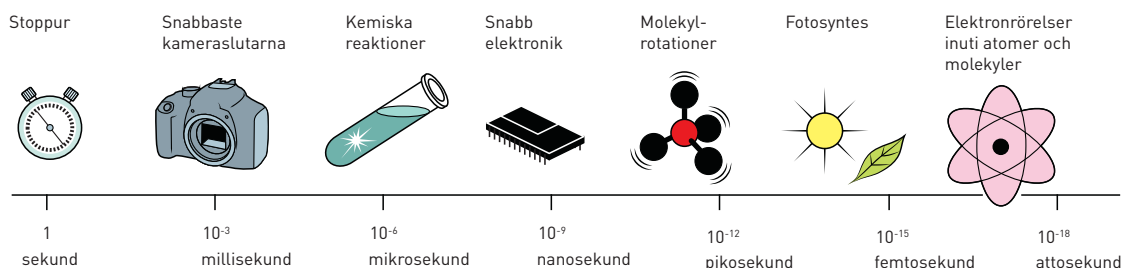


Bild 5. Ju snabbare ljuspulser desto snabbare rörelser går att observera. De nästintill obegripligt korta laserpulserna går ner till några femtosekunder och till och med tusen gånger kortare, till attosekunder, och tillåter att man filmar skeenden som man förut bara kunde gissa sig till. Elektronernas rörelser kring atomkärnan kan nu följas med en attosekundkamera.

Mot än mer extremt ljus

Många tillämpningar av de nya laserteknikerna väntar om hörnet – snabbare elektronik, effektivare solceller, bättre katalysatorer, kraftfullare acceleratorer, nya energikällor, designade läkemedel. Inte undra på att konkurrensen inom laserfysiken är hård.

Donna Strickland fortsätter nu sin forskarkarriär i Kanada, medan Gérard Mourou, som återvänt till Frankrike, är engagerad i en gemensam europeisk satsning på laserteknik, bland andra projekt. Han initierade och ledde tidigare utvecklingen av ELI (Extreme Light Infrastructure) med tre anläggningar – i Tjeckien, Ungern och Rumänien – som ska stå klara om några år. Den planerade högsta toppeffekten på 10 petawatt motsvarar en superkort blix från hundra tusen miljarder glödlampor.

Anläggningarna kommer att ha olika specialiteter – attosekundforskning i Ungern, kärnfysik i Rumänien och högenergetiska partikelstrålar i Tjeckien. Nya och ännu kraftfullare anläggningar skissas även på i Kina, Japan, USA och Ryssland.

Redan i dag spekuleras det om nästa steg: att öka effekten tiofalt, till 100 petawatt. Visionerna för framtida lasertekniker stannar inte där. Varför inte en effekt på zettawatt (en miljon petawatt, 10^{21} watt), eller pulser ner till zeptosekunder, som motsvarar en nästan obegripligt liten tidsskärva på 10^{-21} sekunder? Nya horisonter öppnar sig med framtida studier av kvantfysik i vakuum, eller produktion av intensiva protonstrålar som kan användas till att utradera cancerceller i kroppen. Men redan nu låter de i år belönade uppfinningarna oss rumstera om i mikrovärlden i bästa Alfred Nobel-anda: till största nytta för mänskligheten.

Mot allt högre intensitet

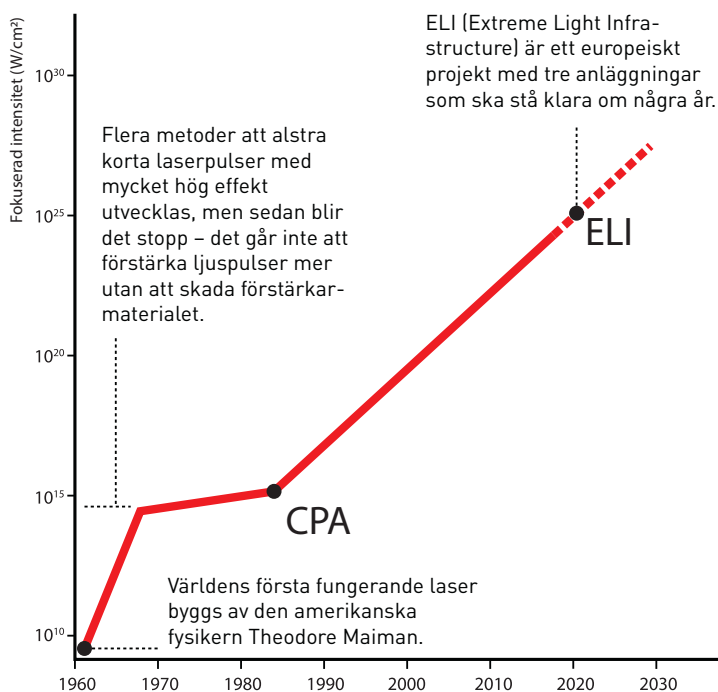


Bild 6. Utveckling av laserpulsens högsta intensitet. Den i år prisbelönade CPA-tekniken står till grund för den lavinartade utvecklingen av allt starkare laserpulser.

LÄNKAR OCH LÄSTIPS

Mer information om årets priser, bland annat en vetenskaplig bakgrundsartikel på engelska, finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, www.kva.se, och <http://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.nobelcenter.se.

Artiklar

Ashkin, A. (1997) Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 94, pp. 4853–4860

Strickland, D. och **Mourou, G.** (1985) Compression of Amplified Chirped Optical Pulses, *Optics Communications*, vol. 56, nr 3

Video

Ashkin, A. och **Gordon, J. P.** (2014) Symposium 2014, Optical Society, San Jose, California, www.youtube.com/watch?v=Lx4sZKY0YGY

Ashkin, A. (2004) Harvey Prize 2004, Technion, Israel, www.youtube.com/watch?v=KmlVNA2nJQJ

Strickland, D. (juni 2014) 'From Ultrafast to Extreme Light': Celebrating Gérard Mourou (Part 2), Ann Arbor, Michigan, USA, www.youtube.com/watch?v=5ucw-T2EX-8 (startar ca 26 min in i filmen)

Mourou, G. (juni 2014) 'From Ultrafast to Extreme Light': Celebrating Gérard Mourou (Part 8), Ann Arbor, Michigan, USA, www.youtube.com/watch?time_continue=2&v=iaFpuwbu4wl (startar ca 28 min in i filmen)

Kungl. Vetenskapsakademien har beslutat utdela Nobelpriset i fysik 2018

”för banbrytande uppfinningar inom laserfysik”

med ena hälften till

och med andra hälften gemensamt till

ARTHUR ASHKIN

Född 1922 (96 år) i New York, USA.
Fil.dr 1952 vid Cornell University,
Ithaca, USA.

<https://history.aip.org/phn/11409018.html>

GÉRARD MOUROU

Född 1944 (74 år) i Albertville,
Frankrike. Fil.dr 1973.

www.polytechnique.edu/annuaire/en/users/gerard.mourou

DONNA STRICKLAND

Född 1959 (59 år) i Guelph, Kanada.
Fil.dr 1989 vid University of
Rochester, USA.

<https://uwaterloo.ca/physics-astronomy/people-profiles/donna-strickland>

”för den optiska pincetten och dess tillämpning på biologiska system”

”för deras metod att alstra högintensiva, ultrakorta optiska pulser”