

Nobelpriset i fysik 2005

Årets Nobelpris i fysik belönar tre forskare inom det optiska området. **ROY GLAUBER** belönas för sin teoretiska beskrivning av ljuspartiklarnas uppträdanden, medan **JOHN HALL** och **THEODOR HÄNSCH** belönas för utveckling av laserbaserad precisionsspektroskopi, dvs. färgbestämning av atomers och molekylers ljus med yttersta noggrannhet.

Var går gränsen för det mätbara?

Vågor eller partiklar?

Den största delen av vår kunskap om omvärlden får vi genom elektromagnetiska vågor, nämligen synligt ljus. Med ljusets hjälp kan vi orientera oss i det dagliga livet eller betrakta universums mest avlägsna galaxer. Den gren av fysiken som beskriver ljusfenomen är optiken. Men vad är ljus och hur skiljer sig olika typer av ljus från varandra? Hur skiljer sig ljuset från ett stearinljus från ljuset som lasern i en CD-spelare skickar ut? Ljusets hastighet genom den tomma rymden är enligt Albert Einstein konstant. Går det att använda ljus till att mäta tid ännu noggrannare än med dagens atomklockor? Det är frågor som dessa som besvarats av årets Nobelpristagare i fysik.

I slutet av 1800-talet trodde man att det gick att förklara de elektromagnetiska fenomenen med hjälp av den teori den skotske fysikern James Clerk Maxwell presenterat; han såg ljuset som en vågrörelse. Men ett oväntat problem uppstod då man försökte förstå strålningen från upphettad materia, som t.ex. solen. Fördelningen av styrkan hos de olika färgerna stämde inte alls med de teorier som utvecklats på basis av Maxwells idéer. Det borde komma mycket mer violett och ultraviolett strålning från solen än vad man observerat.

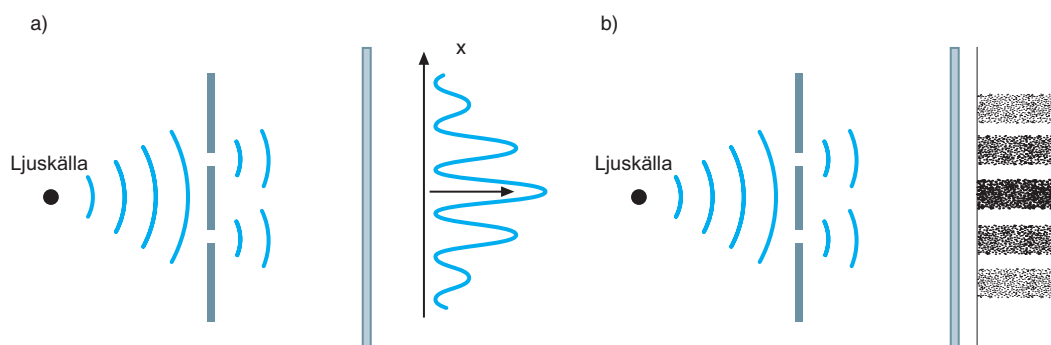
Dilemmat löstes år 1900 av Max Planck (Nobelpris 1918), som hittade en formel som passade den observerade spektralfördelningen perfekt. Planck beskrev fördelningen som resultat av det upphettade materialets inre vibrationstillstånd. Einstein presenterade i ett av sina berömda arbeten för precis hundra år sedan – år 1905 – sin teori att även strålningsenergin, ljuset, strömmar som individuella energipaket, s.k. kvanta. Då ett sådant energipaket träffar en metallyta, kommer energin att överföras till en elektron som frigörs och lämnar materialet – den *fotoelektriska effekten*, vilken inkluderades i Einsteins Nobelpris 1921.

Einsteins hypotes innebär att ett enstaka energipaket, senare benämnt en foton, ger all sin energi till bara en enda elektron. Alltså kan vi räkna kvanta i strålningen genom att observera och räkna antalet elektroner, dvs. den elektriska ström som kommer från metallytan. Nästan alla senare ljusdetektorer bygger på denna effekt.

Då kvantteorin utvecklades under 1920-talet fick den svårigheter i form av orimliga, oändliga uttryck. Detta problem löstes först efter andra världskriget, då kvantelektrodynamiken, QED, utvecklades (Nobelpriset i fysik 1965 till Tomonaga, Schwinger och Feynman). QED blev fysikens mest exakta teori och var central för partikelfysikens utveckling. Till en början ansågs det emellertid inte nödvändigt att använda QED för synligt ljus utan man beskrev optiska fenomen som vanlig vågrörelse med vissa slumpartade intensitetsväxlingar. En detaljerad kvantteoretisk beskrivning ansågs vara onödig.

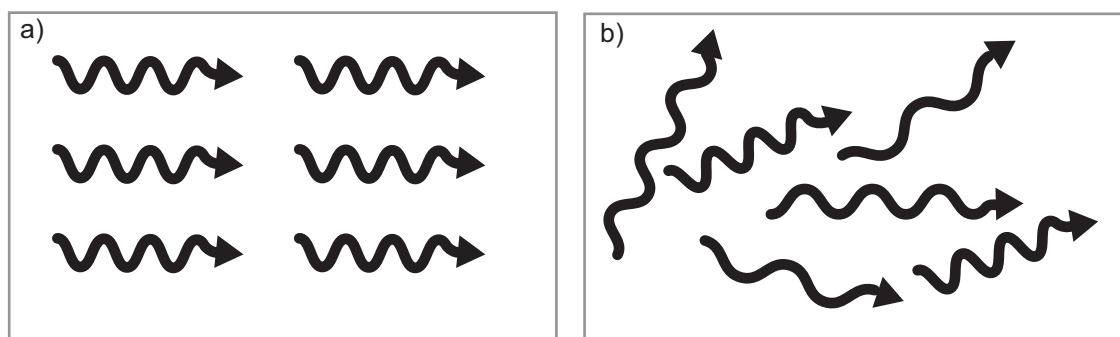
Ordnat och slumpartat ljus

Fram till utvecklingen av lasern och liknande apparater kunde de flesta ljusfenomen förstås med Maxwells klassiska teori. Ett exempel ses i fig. 1 a, där ljuset som infaller mot två spalter uppvisar ett periodiskt mönster av intensiteten på en skärm. Om ljuset består av en enda våglängd, och är koherent (se fig. 2 a), blir intensiteten i stort sett noll i minimiområdena.



Figur 1. Skillnaden mellan ett klassiskt och ett kvantfysikaliskt betraktande av ljus. Passagen av ljus genom en dubbelspalt när det betraktas som a) en elektromagnetisk vågrörelse, b) ett flöde av partiklar. Notera att samma interferensmönster uppstår som samverkan mellan två vågor i det första fallet eller fördelningen av enskilda partiklar i det andra fallet.

En mer realistisk bild behövs för att beskriva ljuset från en vanlig glödlampa. Dess våglängder har en fördelning, och fas och riktning varierar; vi ser källan som anfäktad av slumpartat brus. Detta ljus kallas inkoherent och kan beskrivas som i fig. 2 b. Inkoherensen försämrar alltså tydligheten hos interferensmönstret i fig. 1 a.



Figur 2. Skillnaden mellan a) koherent och b) inkoherent strålning. I det koherenta ljuset har strålarna samma fas, våglängd och riktning.

Tidigare var de flesta ljuskällor baserade på värmestrålning, och speciella arrangemang krävdes för att interferensmönstret skulle ses. Detta förändrades då lasern med sitt perfekt koherenta ljus förverkligades. Strålning med väldefinierad fas och frekvens var förstås välkänd från radiotekniken. Men på något sätt föreföll det konstigt att se ljuset från en värmeljus källa som vågrörelse – den oordning som kommer därifrån verkade kunna beskrivas av slumpartat fördelade fotoner.

Kvantoptikens födelse

Den ena hälften av årets Nobelpris i fysik går till **Roy J. Glauber** för hans pionjärarbete att tillämpa kvantfysik på optiska fenomen. År 1963 redovisade han sina resultat; han utvecklade en metod för hur man kan använda elektromagnetisk kvantisering för att förstå optiska

observationer. Han genomförde en konsekvent beskrivning av fotoelektrisk detektion med hjälp av kvantfältteorin. Nu kunde han visa att den ”sammanbuntning” som R. Hanbury Brown och R. Twiss påvisat var en naturlig följd av att värmestrålningens intensitet varierar slumpartat. En idealisk koherent laserstråle uppvisar inte alls motsvarande effekt.

Men hur kan en ström av fotoner, oberoende partiklar, ge upphov till interferensmönster? Vi möter här ett exempel på kvantfenomenens dualism. Elektromagnetisk energi fortplantar sig i mönster som bestäms av klassisk optik. Sådana energifördelningar bildar landskap i vilka fotonerna kan fördelas. Dessa är enskilda individer, men de måste följa de banor som föreskrivs av optiken. Detta ger förklaring till termen kvantoptik. För låga ljusintensiteter kommer tillståndet att beskriva enbart ett fåtal fotoner. De enskilda partikelobservationerna kommer att bygga upp optikens mönster sedan ett tillräckligt antal fotoelektroner observerats. I stället för som i fig. 1 a skulle kvantfysiken beskriva mönsterbildningen som i fig. 1 b.

Ett väsentligt drag i den teoretiska kvantbeskrivningen av optiska observationer är att, då en fotoelektron observerats, har en foton absorberats och fotonfältets tillstånd undergått en förändring. Då flera detektorer samordnas kommer systemet att bli känsligt för kvanteffekter, mer tydliga om bara några få fotoner finns i fältet. Experiment involverande flera fotodetektorer har senare genomförts, och de beskrivs alla av Glaubers teori.

Glaubers arbete år 1963 lade grunden för den kommande utvecklingen inom det nya området *kvantoptik*. Det blev snart klart att den tekniska utvecklingen gjorde det nödvändigt att använda den nya kvantbeskrivningen av fenomenen.

En observerbar effekt av ljusets kvantnatur är motsatsen till den nämnda sammanbuntning som fotoner uppvisar, så kallad ”anti-sammanbuntning” (eng. anti-bunching). I vissa situationer kan fotonerna nämligen uppträda mer sällan i par än i en rent slumpartad signal. Sådana fotoner kommer från ett kvanttillstånd som över huvud taget inte kan beskrivas som klassiska vågor. En kvantprocess kan nämligen bereda ett tillstånd med väl separerade fotoner, i motsats till en helt slumpartad.

Kvantfysiken sätter de yttersta gränserna och lovar nya tillämpningar

I tekniska tillämpningar är kvanteffekterna ofta mycket små. Fältets tillstånd väljs så att det kan tillskrivas väldefinierade fas- och amplitudegenskaper. Även i laboriemätningar sätter kvantfysikens obestämthet sällan gränsen. Men den osäkerhet som ändå finns uppträder som en slumpartad variation i observationerna. Detta kvantbrus utgör den slutliga gränsen för optiska observationers precision. I högupplösta frekvensmätningar, kvantförstärkare och frekvensreferenser kan till sist bara ljusets kvantnatur sätta en gräns för hur noggranna våra apparater kan bli.

Kunskap om kvanttillstånden kan även utnyttjas direkt. Då kan vi få helt nya tekniska tillämpningar av kvantfenomenen, t.ex. för att skapa säkert krypterade meddelanden inom kommunikation och informationsbehandling.

Laserbaserad precisionsspektroskopi

Historien lär att nya fenomen och strukturer har upptäckts tack vare förbättrad precision i mätningarna. Ett utomordentligt exempel är atomspektroskopin, där energinivåstrukturen hos atomer studeras. En förbättrad upplösning har givit fördjupad förståelse av såväl atomernas finstruktur som atomkärnans egenskaper. Den andra hälften av årets Nobelpris i fysik, till **John L. Hall** och **Theodor W. Hänsch**, belönar forskning och utveckling inom precisionslaserspektroskopin, där den *optiska frekvenskamstekniken* blivit av särskilt stor vikt. De framsteg som gjorts inom denna vetenskapsgren kan ge oss tidigare oanade möjligheter att undersöka naturkonstanterna, söka skillnaden mellan materia och antimateria samt mäta tid med oöverträffad precision. Precisionsspektroskopin utvecklades från enkla och klara frågeställningar.

Hur lång är en meter?

Svårigheten med att fastslå den exakta längden av en meter illustrerar de utmaningar den moderna laserspektroskopin bjuder på. Den internationella myndigheten för vikter och mått, som sedan 1889 har rätt att besluta om de exakta definitionerna, frångick 1960 den rent materiella mätstickan. Denna låg inlåst i Paris och dess längd kunde bara med svårighet distribueras runt världen.

Genom att utnyttja mätningar av spektra införde man en atomär definition: en meter definierades som ett visst antal våglängder av en viss spektrallinje i ädelgasen krypton. Några år senare infördes en atomär definition också av en sekund: tiden för ett visst antal svängningar av resonansfrekvensen av en särskild övergång i cesium, vilken kunde avläsas på de cesium-baserade atomuren. Dessa definitioner gjorde det möjligt att bestämma ljushastigheten som produkten av våglängd och frekvens.

John Hall var en viktig aktör, då det gällde att mäta ljushastigheten, utnyttjande lasrar med extremt hög frekvensstabilitet. Noggrannheten begränsades dock av den valda meterdefinitionen. År 1983 definierades därför ljushastigheten till exakt 299 792 458 m/s, i överensstämmelse med de bästa mätningarna, men nu med felet noll! Som en konsekvens av detta blev en meter den sträcka ljuset färdades på $1/299\,792\,458$ s.

Att mäta optiska frekvenser som ligger i området kring 10^{15} Hz (svängningar per sekund) var dock fortfarande mycket svårt, på grund av att cesiumklockan hade ungefär 10^5 gånger långsammare svängningar. En lång kedja av högstabiliserade lasrar och mikrovågskällor måste användas vid överbryggandet. Det praktiska utnyttjandet av den nya meterdefinitionen i form av skarpa våglängdsangivelser förblev problematiskt och ett starkt behov av en förenklad metod för frekvensmätning blev uppenbar.

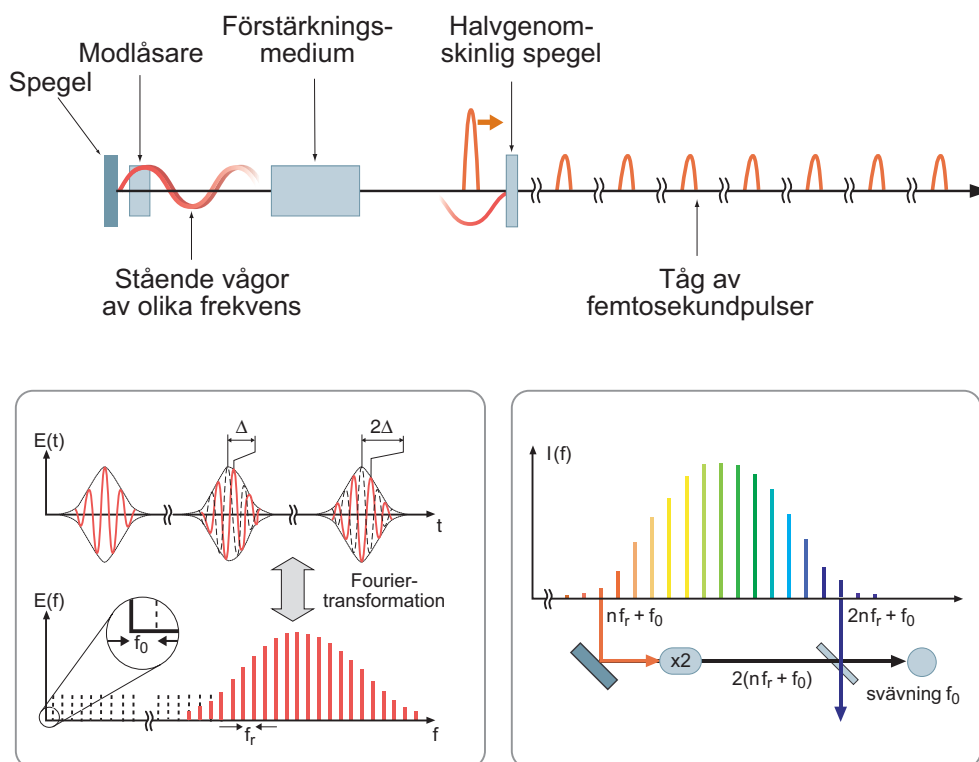
Parallellt med detta skeende fortsatte den snabba utvecklingen av lasern som ett generellt spektroskopiskt verktyg. Metoder togs också fram för att eliminera Dopplereffekten, som annars leder till bredare och svåridentifierbara toppar i ett spektrum. År 1981 belönades N. Bloembergen och A.L. Schawlow med Nobelpriset i fysik för sina bidrag till utvecklandet av laserspektroskopin. Speciellt intressant blir det när en extrem precision kan nås och fundamentala frågor om verklighetens natur kan attackeras. I denna process har Hall och Hänsch varit drivande genom utvecklandet av extremt frekvensstabila lasersystem och mätteknik som kan fördjupa vår kunskap om såväl materiens som rummets och tidens egenskaper.

Frekvenskamsmätning – en ny linjal

Om man vill mäta frekvenser med extremt god noggrannhet måste man använda en laser som skickar ut ett stort antal sammanhängande svängningar. Om sådana svängningar av något olika frekvens sammankopplas kommer resultatet att bli ytterst korta pulser som uppkommer genom interferens. Detta sker dock endast om de olika svängningarna (moderna) är faslåsta till varandra, s.k. modlåsning. (se fig. 3). Ju fler olika svängningar man lyckas låsa i samklang, desto kortare blir pulserna. En 5 fs lång puls (en femtosekund, fs (10^{-15} s), motsvarar en miljondels miljarddel sekund) låser ungefär en miljon olika frekvenser vilka behöver täcka en stor del av det synliga frekvensområdet. Detta kan numera uppnås i lasermedia som färgämnen eller titandopade safirkristaller. Ett litet "ljusklot" som studsar mellan speglarna i lasern uppstår genom att ett stort antal skarpa och jämnt fördelade frekvensmoder lyser hela tiden! Lite av ljuset släpps ut som ett tåg av laserpulser genom den delvis genomskinliga spegeln i ena änden. Genom att även pulsade lasrar sänder ut skarpa frekvenser kan de användas för laserspektroskopi med hög upplösning. Detta insåg Hänsch redan i slutet av 1970-talet och lyckades även visa det experimentellt. Också V. P. Chebotayev i Novosibirsk (avliden 1992) kom till liknande insikt.

Ett verkligt genombrott kom dock först omkring 1999, då Hänsch förstod att de då tillgängliga extremt kortpulsiga lasrarna enkelt kunde användas för optisk frekvensmätning direkt kopplad till cesiumklockan. Dyliga lasrar har nämligen en frekvenskam spridd över hela det synliga området. Den optiska frekvenskamstekniken, som den kommit att kallas, grundar sig alltså på en "räcka" av jämnt fördelade frekvenser, ungefär som tänderna på en kam eller strecken på en linjal. En okänd frekvens som ska bestämmas kan relateras till någon av frekvenserna längs "linjalen". Hänsch och medarbetare visade övertygande att frekvensmellanrummen verkligen var jämna med extrem precision. Ett problem var dock att bestämma det absoluta värdet på frekvensen; även om avståndet mellan kammens tänder är mycket välbestämt tillkommer en okänd gemensam frekvensförskjutning. Denna måste kunna fastställas exakt för att en okänd frekvens skall kunna bestämmas. Hänsch utvecklade teknik för detta varigenom även ljusets fas kunde stabiliseras, men en enkel och praktisk lösning demonstrerades först av Hall och hans medarbetare omkring år 2000. Om frekvenskammen kan göras så bred att de högsta frekvenserna är mer än dubbelt så höga som de lägsta (en oktav av svängningar) kan frekvensförskjutningen, f_0 beräknas genom en enkel subtraktion som involverar frekvenserna i oktavs ändrar (se fig. 3):

$$2f_n - f_{2n} = 2(nf_r + f_0) - (2nf_r + f_0) = f_0$$



Figur 3. Frekvenskamsteknikens princip. Den övre delen av bilden visar schematiskt hur laserpulserna uppstår. I nedre vänstra bilden visas dels pulsernas tidsberoende, där varje puls innehåller enbart ett fåtal vibrationer, dels hur moderna fördelas på olika frekvenser. Den spektrala fördelningen består av en kam av frekvenser vilkas separation är ytterst väldefinierad. Spektrets nollställe är dock okänt och representerar en förskjutning f_0 . Med icke-linjär optisk teknik kan spektrets frekvenser fördubblas, vilket visas i nedre högra bilden. Dess lägsta frekvens kan då jämföras med det ursprungliga högsta frekvens och förskjutningen f_0 kan bestämmas.

Sådana pulser med tillräckligt brett frekvensomfång kunde skapas i så kallade fotoniska kristallfibrer, där materialet delvis ersatts av hålrum. I dessa kan ett brett frekvensspektrum genereras av ljuset självt. Hänsch och Hall jämte medarbetare har sedan, delvis i gemensamma arbeten, förfinat tekniken till ett enkelt verktyg, som redan fått vitt spridd använd-

ning, och som även blivit kommersiellt tillgänglig. En okänd skarp laserfrekvens kan nu mätas genom att man observerar svävningen mellan denna och den närmast liggande tanden i frekvenskammen; svävningen kommer att hamna vid en lätthanterlig radiofrekvens. Detta är analogt med att svävningen mellan två stämgaflar kan höras vid en mycket lägre frekvens än de individuella tonernas.

Helt nyligen har frekvenskamstekniken utvidgats till det extremt ultravioletta området, som nås genom övertongenerering från korta pulser. Detta kan leda till att en utomordentligt hög precision kan erhållas vid mycket höga frekvenser och kanske ännu mer noggranna klockor vid röntgenfrekvenser kommer att kunna förverkligas.

En annan aspekt av frekvenskamstekniken är, att den kontroll av den optiska fasen som den medger, också är av största vikt i experiment med ultrakorta femtosekundpulser och vid ultra-intensiv laser-materieväxelverkan. De höga, i frekvens jämnt fördelade, övertonerna kan faslåsas till varandra, varvid enskilda attosekundpulser av ca 100 as längd ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) kan alstras genom interferens på liknande sätt som i den ovan diskuterade modlåsningen. Den nu belönade tekniken har således största relevans för precisionsmätningar såväl i frekvens- som i tidsområdet.

En vy mot framtiden

Det förefaller nu möjligt att med frekvenskamstekniken i framtiden kunna göra frekvensmätningar med en noggrannhet som kan närma sig en del på 10^{18} . Detta kommer snabbt att aktualisera övergång till en ny, optisk standardklocka. Vilka fenomen och mätproblem kan utnyttja den extrema precision som nu erbjuds?

Precisionen möjliggör satellitbaserade navigationssystem, GPS, med förbättrad upplösning. Precision kommer att behövas t.ex. för navigation under långa rymdfärder samt för rymdbaserade teleskoparrangemang, vilka söker efter gravitationsvågor eller gör precisionstester av relativitetsteorin. Tillämpningar inom telekommunikation kan även komma.

Den förbättrade mätnoggrannheten kan nyttjas vid studiet av antimaterians relation till ordinär materia. Av speciellt intresse är väte; då antiväte så småningom kommer att kunna studeras experimentellt på liknande sätt som ordinärt väte, kan deras fundamentala spektroskopiska egenskaper jämföras.

En utökad precision i fundamentala mätningar kan slutligen nyttjas till att testa naturkonstanternas eventuella förändringar med tiden. Sådana mätningar har påbörjats men ännu har dock inga avvikelser kunnat konstateras. En förbättrad precision möjliggör emellertid allt mer definitiva slutsatser angående denna fundamentala fråga.

LÄNKAR OCH LÄSTIPS

På Nobelprisens hemsida, www.nobelprize.org, finns mer information om årets priser. Där kan man bland annat se presskonferensen och en intervju med en ämnesexpert som webb-TV. Där finns också en mer avancerad text som mest vänder sig till fysiker.

Litteratur:

Advanced information on the Nobel Prizes in Physics 2005, The Royal Swedish Academy of Sciences: www.nobelprize.org/physics/laureates/2005/phyadv05.pdf

R. Feynman, QED, The Strange Theory of Light and Matter, Princeton Univ. Press, Princeton 1985.

P. L. Knight and L. Allen, Concepts of Quantum Optics, Pergamon Press, Oxford 1983.

H. Paul, Introduction to Quantum Optics, Cambridge Univ. Press, Cambridge 2004.

D. Kleppner, On the matter of the meter, Physics Today, March, p. 11, 2001

R. Holzwarth, M. Zimmermann, Th. Udem and T.W. Hänsch, IEEE J. Quant. Electr. 37, 1493, 2001

J.L. Hall, J. Ye, S.A. Diddams, L.-S. Ma, S.T. Cundiff and D.J. Jones, IEEE J. Quant. Electr. 37, 1482, 2001

Länkar:

www.kva.se/swe/awards/nobel/nobelprizes/press/phyread05.asp

<http://phys.educ.ksu.edu/>

www.aip.org/pt/vol-54/iss-3/p11.html

<http://www.physics.mq.edu.au/~drice/quoptics.html>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html> (läs under "Light and Vision")

<http://hem.passagen.se/bear71/laser/>

<http://nobelprize.org/physics/articles/brink/index.html>

PRISTAGARNA

ROY J. GLAUBER

Physics Department
Harvard University
17 Oxford Street
Lyman 331 Cambridge
MA 02138, USA

www.physics.harvard.edu/people/facpages/glauber.html

Amerikansk medborgare. Född 1925 (80 år) i New York, NY, USA. PhD i fysik 1949 vid Harvard University, Cambridge, MA, USA. Mallinckrodt Professor i fysik vid Harvard University.

JOHN L. HALL

JILA, University of Colorado
och NIST
Boulder
440 UCS CO 80309-0440
USA

<http://jilawww.colorado.edu/www/faculty/#hall>

Amerikansk medborgare. Född 1934 (71 år) i Denver, CO, USA. PhD i fysik 1961 vid Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, PA, USA. Senior Scientist vid the National Institute of Standards and Technology, Boulder samt Fellow vid JILA, Boulder, CO, USA.

THEODOR W. HÄNSCH

Ludwig-Maximilians-Universität
Schellingstr. 4
80799 München
Tyskland

www.mpg.de/~haensch/hm/Haensch.htm

Tysk medborgare. Född 1941 (63 år) i Heidelberg, Tyskland. PhD i fysik 1969 vid University of Heidelberg. Föreståndare för Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching samt professor i fysik vid Ludwig-Maximilians-Universität i München, Tyskland.