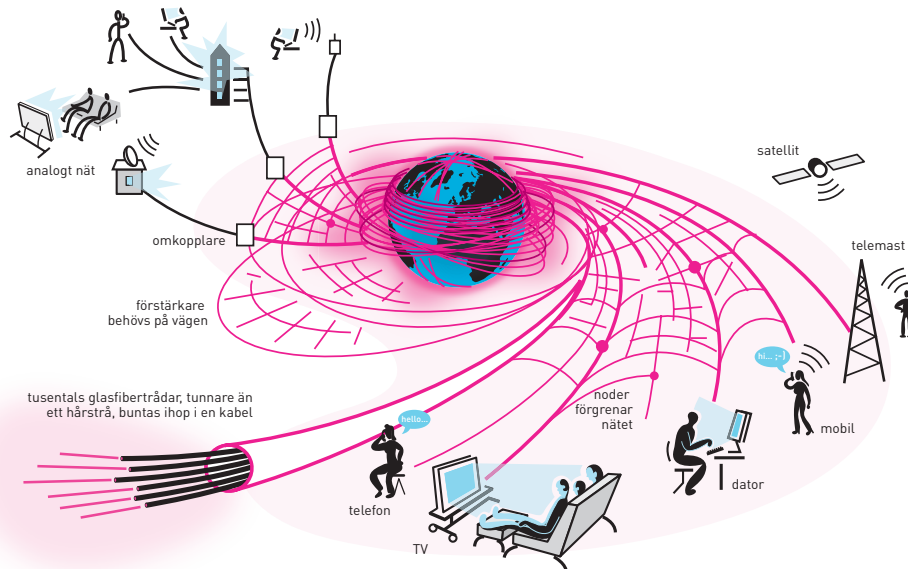


Ljusets mästare

Nobelpriset i fysik utdelas i år för forskargärningar som kommit att genomsyra hela vår tillvaro. De har skapat nya villkor för vårt dagliga liv och har gett vetenskapen helt nya verktyg att arbeta med. **Charles Kuen Kao** får ena halvan av priset för upptäckter som banade väg för den optiska fibern i vilken nästan all tele- och datatrafik sker i dag. **Willard Sterling Boyle** och **George Elwood Smith** delar priset andra halva för att ha uppfunnit en digital bildsensor, CCD – charge-coupled device, som tidigt blev nästan all fotografis elektroniska öga.

När Nobelpriset i fysik kungörs i Stockholm får en stor del av världen veta det i praktiskt taget samma stund. Med nästan ljusets hastighet, den högsta möjliga, sprids budskapet. Texter, bilder, röster och film som far via optisk fiber och genom rymden och är på plats genast i behändiga apparater är något många redan tar för givet. Den optiska fibern är en förutsättning för denna lavinartade utveckling av kommunikationerna som Charles Kao såg framför sig redan för fyrtio år sedan.



Figur 1. Optiska fibrer av glas utgör det moderna kommunikationssamhällets blodomlopp. All världens optiska fibertråd räcker till drygt 25 000 varv runt jordklotet, och varje dag växer glasfibern med flera tusen kilometer.

Bara några år senare ändrade Willard Boyle och George Smith villkoren för all fotografi. Ingen film behövs längre i en kamera där bilderna fångas elektroniskt på en bildsensor. Det elektroniska ögat, CCD, blev den första framgångsrika tekniken för digital överföring av bilder. Den öppnade vägen för den oavbrutna bildström som de optiska fiberkablarna fylls med dagligen. Bara den optiska fibern klarar av att överföra så stora mängder data som de elektroniska bildsensorerna ger upphov till.

Så blev det ljus

Det är i solljuset vi ser världen. Men det tog lång tid innan människan lärde sig att tvinga in ljus i en fåra för att bära kodade budskap till många människor samtidigt, långt borta eller nära. Utvecklingen krävde otaliga små och stora uppfinningar som tillsammans ligger till grund

för det moderna informationssamhället. Den nu prisade optiska fibern krävde modern glas-teknologi för att utvecklas och tillverkas. En pålitlig ljuskälla behövdes också – den kom med lasern och halvledartechniken. Så skulle hela det sinnrika nätverket byggas ihop och utvidgas med transistorer, förstärkare, omkopplare, sändare och mottagare, och andra apparater i samspel. Det är ett verk av tusentals forskare och uppfinnare världen över som gjorde revolutionen inom telekommunikationerna möjlig.

Leka med ljuset

Eiffeltornet är det beständiga minnesmärket från världsutställningen i Paris 1889 till hundraårsminnet av den franska revolutionen. Mindre beständigt var det fantastiska ljusspel som uppfördes med fontäner som dag och natt skickade färgsprakande vattenstrålar högt upp i luften. Inte minst elektriciteten gjorde showen möjlig. Men också tidigare försök med vattenledda ljusstrålar inspirerade, de första utfördes kring mitten av 1800-talet. Då kunde man se att när solljus belyste en vattenstråle färdades det igenom strålen och följde dess böjda form.

Samspelet mellan ljus och glas eller vatten hade man naturligtvis upptäckt långt tidigare. Glas tillverkades redan för 4500 år sedan i Mesopotamien och Egypten. Venetianska glasblåsare kan inte ha varit obekanta med det vackra ljusspelet i deras snirkliga dekor. Slipat glas användes i kandelabrar och kristallkronor, regnbågens gåta gäckade långt innan svaret kom med optikens lagar för ljusets brytning och spridning på 1600-talet. Men det var först för drygt hundra år sedan som tanken föddes om att utnyttja ljusstrålar i fångenskap.

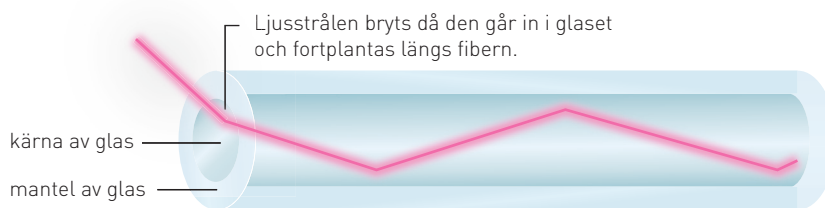
Fånga ljuset

En solstråle som faller ner i vatten ändrar riktning när den passerar vattenytan – det beror på att vatten har högre optisk täthet än luft. Om strålen riktas åt andra hållet – från vatten och ut – kan det hända att den inte kommer ut alls, den reflekteras helt tillbaka. Fenomenet ligger bakom optiska ljusledare där ljuset fångas helt innanför väggarna hos en ledare med större optisk täthet än omgivningen. En stråle som riktas in i en glasledare studsar mot glasväggen och rör sig vidare framåt eftersom glasets optiska täthet är större än den omgivande luftens (figur 2).

Redan på 1930-talet använde läkare och tandläkare korta och enkla optiska fibrer. Med ett knippe tunna trådar av glas kunde de kika in i magsäcken hos patienter eller belysa tänderna vid ingrepp. Men de hopbuntade glastrådarna läckte ljus i kontakt med varandra och blev fort slitna med ännu större ljusförluster till följd. Att klä den nakna fibern i en mantel av glas med lägre optisk täthet innebar en drastisk förbättring av tekniken och ledde på 1960-talet till att medicinska instrument för gastroskopi och andra tillämpningar började tillverkas industriellt.

För långväga kommunikation var dock glasfibrerna oanvändbara. Få intresserade sig egentligen för ljus, tiden var inne för elektronik och radiovågsteknik. 1956 lades den första Atlantkabeln för 36 telefonsamtal samtidigt. Snart skulle även satelliter täcka de allt växande behoven, men telefonin ökade dramatiskt och TV-sändningar krävde ännu större överföringskapacitet.

Jämfört med radiovågor kan infrarött eller synligt ljus bära tiotusentals gånger mer information. Så snart kunde man inte längre bortse från ljusvågorna.



Figur 2. Optisk fiber. En fiber är tunnare än ett hårstrå. Inuti studsar strålen mot gränsen mellan fiberkärnan och manteln då glaset i kärnan har högre optisk täthet än i manteln. Kärnan är cirka 10 mikrometer i diameter, med manteln är fibern 125 mikrometer. Infrarött ljus med en våglängd på 1,55 mikrometer, där ljusförlusterna är lägst, används idag för långväga fiberoptisk kommunikation.

Leda ljuset

Uppfinningen av lasern i början på 1960-talet blev ett viktigt steg för fiberoptiken. Lasern innebar en pålitlig ljuskälla som gav en intensiv ljusstråle tillräckligt fokuserad för att pumpas in i en smal fiberledare. De första halvledarlasrarna lyste i infrarött och krävde kylning långt under rumstemperatur. Runt 1970 kom mer praktiska lasrar som innebar ett tekniskt genombrott och öppnade vägen för kommunikation med fiberoptik.

All information kunde nu översättas till extremt snabbt blinkande laserljus som motsvarar digitala ettor och nollor. Men hur dessa signaler skulle överföras längre sträckor var fortfarande inte löst – efter en färd på 20 meter fanns bara 1 procent av det insända ljuset kvar i glasfiberna.

Att minska ljusförlusterna blev en utmaning för visionärer. Drygt 30 år gammal tog sig Charles Kuen Kao an pionjärinsatsen. Född i Shanghai 1933 flyttade han med resten av familjen till Hong Kong 1948. Han utbildade sig till elektronikingenjör i London och disputerade där 1965. Då var han redan anställd vid Standard Telecommunication Laboratories där han tillsammans med sin unge medarbetare George A. Hockham metodiskt studerade glasfiberna. Som mest en procent av ljuset kvar efter 1 000 meters färd i glasfibern, istället för 20 meter, blev målet.

I januari 1966 presenterade han sina slutsatser. Det är inte ojämnheter i fibern som är huvudproblemet, hävdade Kao. Själva glaset måste renas, var budskapet. Det är svårt men inte omöjligt, sade han. Kao lyckades få andra forskare att dela sin vision av fiberoptikens framtid – det gällde att framställa glas av aldrig tidigare skådad transparens.

Glas tillverkas av kvartssand med tillsatser som soda och kalk för att sänka sandens smältpunkt. Men till världens renaste glas kan bara ren kvarts användas, påpekade Kao. Den smälter vid nästan 2 000 grader, en svårhanterlig hetta ur vilken ultratunna fiberstrån skulle dras ut. Efter fyra år, 1970, kunde forskare vid amerikanska Corning Glass Works, en glastillverkare med sekelgamla anor, med kemiska metoder framställa en 1 kilometer lång optisk fiber.

Fyllda med ljus

Ledningar av glas må låta bräckliga, men glas byter skepnad när det dras ut till en tunn tråd på rätt sätt. Då blir det starkt, lätt och flexibelt vilket är ett krav om ledningarna ska kunna grävas ner, gå under vatten och svänga runt hörn. Glasfibern räds varken blixtrar, som kan slå ut kopparkablar, eller dåligt väder, som påverkar radiokommunikation.

Det tog tid att linda in jordklotet med fibern. År 1988 lades den första optiska telekabeln på Atlantens botten mellan USA och Europa, över 6 000 kilometer lång. Idag flyter tele- och datakommunikation igenom över en miljard kilometer fiberkablar. Sträcker vi ut fibertråden i dem räcker den till att linda in jordklotet 25 000 varv och den växer för varje timme som går (figur 1).

Hur klara glastrådarna än är dämpas signalen något på vägen och behöver förstärkas när den ska färdas över längre avstånd. Idag gör optiska förstärkare jobbet där det förr krävdes elektronik och med dem försvann onödiga förluster med att omvandla ljus till elektrisk signal och tillbaka.

Numera når 95 procent av ljuset fram efter en kilometer jämfört med Kaos ambition på en procent. Och det går knappt att tala om en enda sorts fiber längre. En delikat sammanvägning av tekniska lösningar, kommunikationsbehov och kostnader får avgöra vilken typ som används var. Fibrerna byggs upp i ett sofistikerat samspel mellan fiberstorleken, dess materialegenskaper och våglängden hos ljuset.

Halvledarlasrar och lysdioder små som sandkorn fyller de fiberoptiska näten med ljus som transporterar nästan all telefoni och datatrafik världen runt. Lägst förluster erbjuder infrarött ljus med en våglängd på 1,55 mikrometer som numera används för all långväga kommunikation (figur 2).

Kapaciteten i ett optiskt kabelnät växer fortfarande lavinartat, tusentals gigabitar i sekunden är inte bara en dröm längre. Utvecklingen går mot interaktiv kommunikation där den optiska fiberkabeln ska nå ända hem till var och en. Tekniken finns redan, vad vi gör av den är en helt annan fråga.

Elektroniskt öga

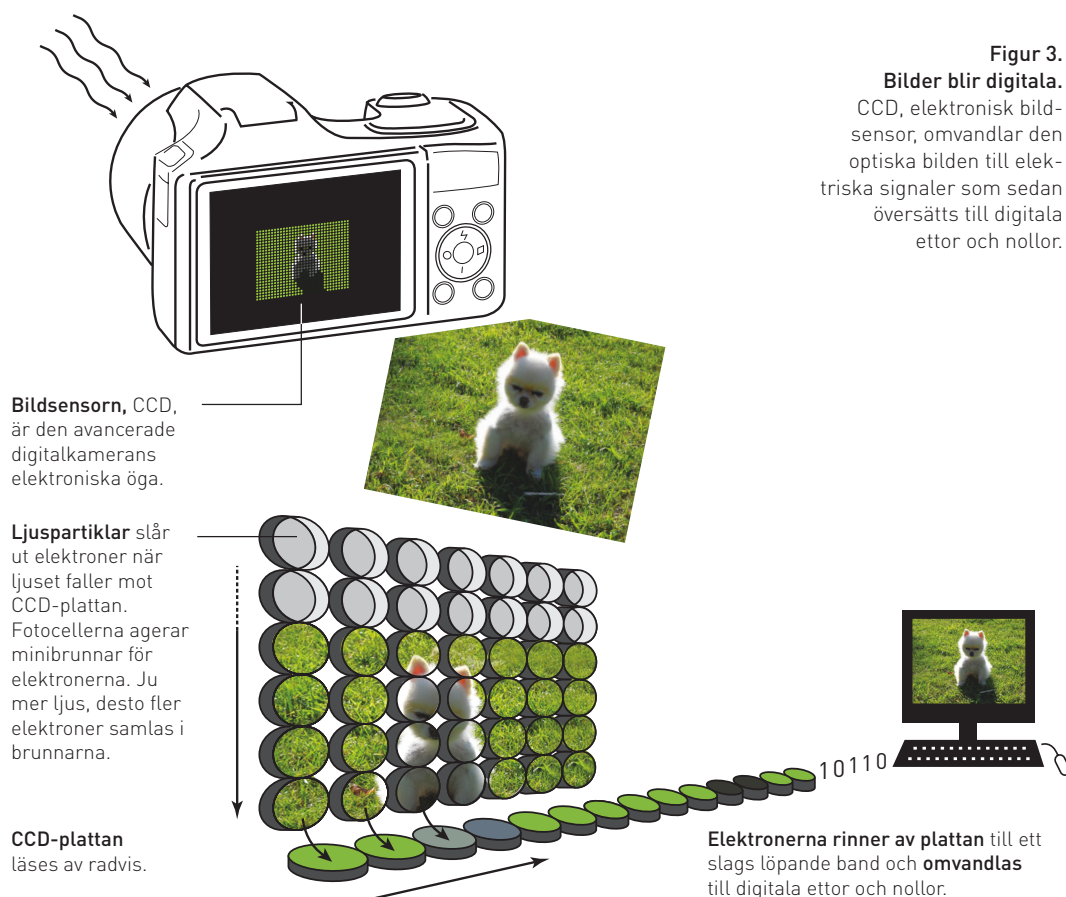
Ibland kommer uppfinningar från ett helt oväntat håll. Bildsensorn, CCD – charge-coupled device, är en sådan uppfinning. Utan CCD skulle digitala kameror utvecklats i långsammare takt. Utan den skulle vi aldrig heller fått se de häpnadsväckande bilderna av världssalltet från rymdteleskopet Hubble eller den röda öknen på vår grannplanet Mars.

Det var inte vad CCD-uppfinnarna Willard Boyle och George Smith föreställde sig från början. När de strax efter lunch den 8 september 1969, enligt loggboken, på en timme skissade fram en bildsensor på sin svarta tavla var fotografier inget de tänkte på (figur 4). Med CCD försökte de skapa ett bättre elektroniskt minne. Något bra minne blev det inte, däremot en oundgänglig del av modern bildhantering. Historien om CCD är ytterligare en bland framgångssagorna i vår elektroniska era.

Bilder blir digitala

En digital bildsensor, CCD, är liksom det mesta i elektronikindustrin byggd av kisel. På en yta liten som ett frimärke rymmer kiselplattan miljoner ljuskänsliga fotoceller. Avbildningstekniken utnyttjar den fotoelektriska effekten, teoretiskt förklarad av Albert Einstein, vilket gav honom 1921 års Nobelpris.

Effekten innebär att när ljuset faller mot kiselplattan slår ljuspartiklarna ut elektroner i fotocellerna. De befriade elektronerna samlas i cellerna som agerar minibrunnar, med mer ljus

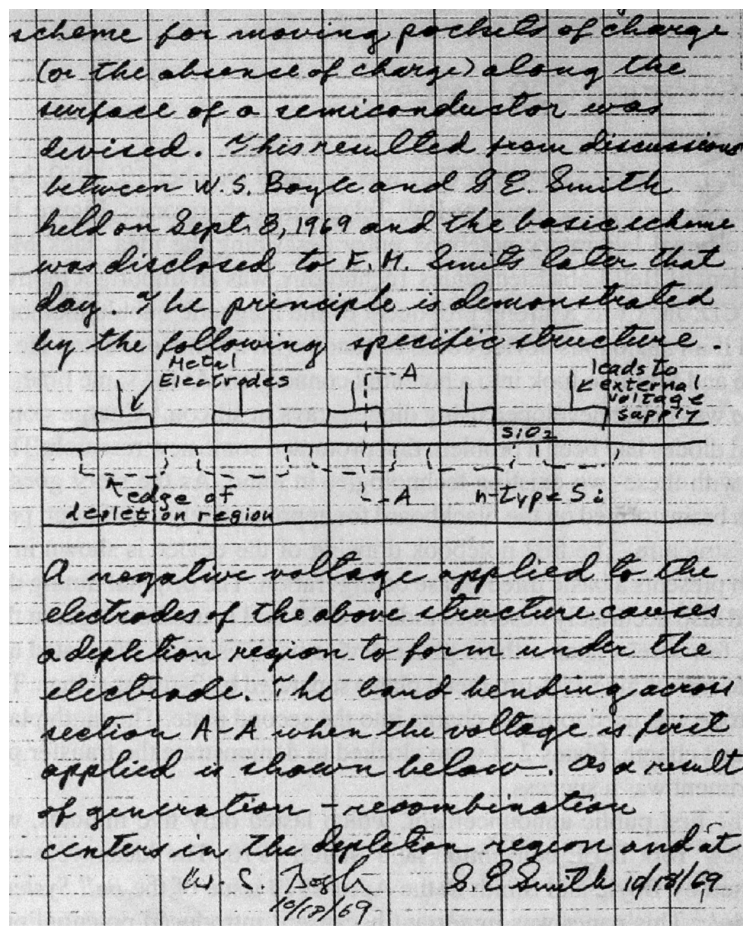


blir elektronerna fler och brunnen fylls på. Genom att fiffigt koppla på elektrisk spänning till CCD-plattan läses innehållet i brunnarna stegvis av – rad för rad rinner elektronerna av plattan till ett löpande band (figur 3). Exempelvis omvandlas en platta med 10 x 10 bildpunkter till ett 100 punkter långt band. På så sätt förvandlar CCD den optiska bilden till elektriska signaler som sedan översätts till digitala ettor och nollor. Varje cell kan sedan återskapas som en bildpunkt, en pixel. Om antalet pixlar på bredden hos en CCD multipliceras med höjden får man för en given storlek på sensorn dess bildupplösning: en CCD-platta med 1 280 x 1 024 pixlar ger en upplösning på 1,3 megapixlar (1,3 miljoner pixlar).

CCD ger en svart-vit bild, så för att få fram färgerna hos synligt ljus används olika filter. Ett sorts filter som består av en av grundfärgerna rött, grönt eller blått placeras över varje cell i bildsensorn. Eftersom våra ögon är mest känsliga för grönt ljus behövs det dubbelt så många gröna pixlar som blå eller röda. För mer avancerade tillämpningar utrustas vissa kameror med flera filter.

Utmanades på jobbet

Att idén om CCD dök upp under Boyle och Smiths korta brainstorm för fyrtio år sedan skyller de mest på sin arbetsgivares internpolitik. Av sin chef på Bell Labs utanför New York blev de uppmanade att anta utmaningen och ge sig in i en tävlan om att göra ett bättre bubbelminne, en annan av Bell Labs uppfinningar. När huvuddragen till CCD blev klara dröjde det bara en vecka tills teknikerna byggde ihop en första prototyp. Som minne är den nu glömd, istället blev CCD hjärtat i många digitala avbildningstekniker.



Figur 4. Originalanteckningar av Boyle och Smiths möte den 8 september 1969 då de först skissade upp idén för CCD.

Fotokamera för alla

Den elektroniska bildsensorns fördelar blev snabbt uppenbara. Knappt ett år efter uppfinningen, 1970, kunde Smith och Boyle för första gången bygga in en CCD i sin videokamera. 1972 konstruerade amerikanska Fairchild en första bildsensor med 100 x 100 pixlar som kom i produktion ett par år senare, 1975 byggde Boyle och Smith själva en digital videokamera med tillräckligt hög bildupplösning för TV-sändningar.

Ändå dröjde det ända till 1981 innan den första kameran med inbyggda CCD-sensorer dök upp på marknaden. Hur klumpig och primitiv den än ter sig med dagens ögon satte den igång en mer kommersiellt inriktad digitalisering av fotokonsten. Fem år senare, 1986, kom en första sensor på 1,4 megapixlar (1,4 miljoner pixlar) och efter ytterligare fyra år, 1995, kom världens första helt digitaliserade fotokamera. Med världens kameratillverkare i startgrparna flödade marknaden snart av allt mindre och allt billigare produkter.

Med bildsensor i stället för film i kameran avslutades en etapp i fotokonstens historia som fick sin start 1839. Då presenterade Louis Daguerre sin uppfinning av fotografisk film inför franska Académie des Sciences.

För vardagsfotografering har digitala kameror blivit en kommersiell framgång. På sistone har CCD fått konkurrens i en annan teknik, CMOS – complementary metal oxide semiconductor, som föddes ungefär samtidigt som CCD. Båda utnyttjar fotoeffekten, men medan elektronerna samlade i en CCD marscherar på rad för att läsas av, jobbar varje fotocell i CMOS för sig.

Amerikanen George Smith, som anställdes på Bell Labs 1959, hann med 30 patent under sin tid på företaget. När han gick i pension 1986 kunde han äntligen ägna sig åt sin passion, långseglingar på världshaven som flera gånger tagit honom jorden runt.

Hans chef 1969, Willard Boyle hade flera viktiga upptäckter bakom sig, bland andra rörande världens första laser som lyste stadigt med rött ljus. Född i en avlägsen del av Nova Scotia i Kanada fick han skolundervisning av sin mor hemma till 15 årsåldern. Han började jobba på Bell Labs 1953; på 1960-talet anslöt han till de 400 000 andra forskare runtom i USA som fick den första människan att landa på månen den 20 juli 1969.

CMOS använder mindre ström, så batteritiden blir längre, och länge har den varit billigare än CCD. Detta måste dock vägas mot högre brus och förlorad bildkvalitet, eftersom CMOS inte är tillräckligt känslig för flertalet avancerade tillämpningar. Men för vardagsbildtagning med mobiltelefoner eller annat enklare bruk används numera ofta CMOS. Båda teknikerna utvecklas dock ständigt och i många tillämpningar är de i dag utbytbara.

För tre år sedan passerade CCD gränsen på 100 megapixel och även om bildkvaliteten inte bara hänger på pixlarna, så anses rekordet ha fört den digitala fotokonsten ytterligare ett kliv framåt. Ändå förutspår en del att framtiden ligger hos CMOS snarare än CCD. Andra hävdar att de två teknikerna kommer att komplettera varandra länge till.

Med pixlar känsliga för ljus

Att CCD skulle bli omistlig för astronomin förutsåg ingen från början. Men det är just med den digitala tekniken som vidvinkelkameran på rymdteleskopet Hubble kan skicka de mest häpnadsväckande bilder tillbaka till jorden (figur 5). Kamerans sensor innehöll från början bara 0,64 megapixel som dock fyrfaldigades genom att fyra sensorer kopplades ihop till sammanlagda 2,56 megapixel. Det var stort på 1980-talet när rymdteleskopet tog form. Idag har Keplersatelliten utrustats med en mosaiksensor på 95 megapixel, som man hoppas kommer att upptäcka jordlika planeter kring andra stjärnor än solen.



Figur 5. Med CCD fick vetenskapen ett helt nytt verktyg att se det förut osedda. Ovan – en av bilderna från rymdteleskopet Hubble. Foto: NASA, ESA och STScI.

Astronomerna insåg tidigt vinsterna med den digitala bildsensorn. Den spänner genom hela ljusspektrumet, från röntgenstrålar till infrarött ljus. Den uppfattar ljus tusenfalt svagare än vad man kunnat se förut. Av 100 inkommande ljuspartiklar upptäcker CCD upp till 90 där en fotoplatta eller våra ögon bara märker en. På några sekunder samlas ljus från avlägsna objekt vilket förr kunde ta timmar. Utslaget blir också direkt proportionellt mot ljusintensiteten – ju mer ljus desto fler elektroner.

Den första bildsensorn från 1974 användes faktiskt till att fotografera månen – den första astronomiska bilden någonsin tagen med en digital kamera. Professionella astronomer började använda den nya tekniken blixtnabbt, redan 1979 monterades en digital kamera på 320 x 512 pixlar på ett av teleskopen på Kitt Peak i Arizona, USA.

I dag är digitala bildsensorer med överallt där foto, film och TV används. De får göra nytta vid övervakning på jorden och från rymden. CCD har också fått en mängd medicinska tillämpningar där kroppen avbildas inifrån, både för diagnostik, som endoskopi, och kirurgiska ingrepp. Den digitala bildsensorn har blivit ett brett använt instrument i vetenskapens tjänst, från botten av oceanerna till den mest avlägsna rymden. Med den kan sällsynta detaljer avslöjas

både hos sådant som ligger mycket långt borta och sådant som är extremt litet. På så sätt tvinnas teknologiska framsteg med de vetenskapliga samman.

LÄNKAR OCH LÄSTIPS

Mer information om årets priser, bland annat en vetenskaplig bakgrundsartikel på engelska, finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, <http://kva.se>, och på <http://nobelprize.org>. Där kan man också se presskonferensen som webb-TV. Mer information om utställningar och aktiviteter kring Nobelprisen finns på www.nobelmuseet.se.

Populärvetenskaplig litteratur

Smith, G.E. (2009) The invention and early history of the CCD. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 607, sid. 1–6.

Janesick, J.R. (2002) Duelling Detectors. *SPIE's oemagazine*, February, sid. 30–33.

Janesick, J.R. (2001) Scientific Charge-Coupled Devices. *SPIE Press Monograph* Vol. PM83.

Hecht, J. (1991) *City of Light: The Story of Fiber Optics*. Oxford University Press.

Einarsson, G. (1993) Optisk kommunikation – en revolution som pågår. *Forskning & Framsteg* 6, sid. 30–35.

Su, F. (1990) Technology of our times: people and innovation in optics and optoelectronics. *SPIE Press*, sid. 80–95.

Vetenskapliga artiklar

Kao, C. K., Hockham, G.A. (1966) Dielectric-fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers-London* 113, sid. 1151.

Boyle, W.S., Smith, G.E. (1970) Charge Couple Semiconductor Devices. *Bell System Technical Journal* 49, sid. 587.

Länkar

www.fiber-optics.info

www.jyi.org/volumes/volume3/issue1/features/peterson.html

PRISTAGARE

CHARLES KUEN KAO

Hap Valley
Hong Kong
Kina

www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/Oral-History:Charles_Kao

Amerikansk och brittisk medborgare. Född 1933 (75 år) i Shanghai, Kina. F.D. i elektroteknik 1965 vid University of London, Storbritannien. Director of Engineering på Standard Telecommunication Laboratories, Harlow, Storbritannien. Vice-chancellor vid Chinese University of Hong Kong, pensionerad sedan 1996.

WILLARD STERLING BOYLE

Wallace
Nova Scotia
Kanada

www.science.ca/scientists/scientistprofile.php?plD=129

Amerikansk och kanadensisk medborgare. Född 1924 (85 år) i Amherst, NS, Kanada. F.D. i fysik 1950 vid McGill University, QC, Kanada. Executive Director vid Communication Sciences Division, Bell Laboratories, Murray Hill, NJ, USA, pensionerad sedan 1979.

GEORGE ELWOOD SMITH

Barnegat
New Jersey
USA

www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/Oral-History:George_E._Smith

Amerikansk medborgare. Född 1930 (79 år) i White Plains, NY, USA. F.D. i fysik 1959 vid University of Chicago, IL, USA. Head of VLSI Device Department, Bell Laboratories, Murray Hill, NJ, USA, pensionerad sedan 1986.