

# f Fysikaktuell

NR 1 • FEB 2015

## Tema: Ljus

ISSN 0283-9148

Därför lyser  
solen!

sid 6-8

Extremt korta  
ljuspulser

sid 16-17

Porträtt:  
Sune Svanberg

sid 24-25

# Svenska Fysikersamfundet

Fysikaktuellt ges ut av Svenska Fysikersamfundet som har till uppgift att främja undervisning och forskning inom fysiken och dess tillämpningar, att föra fysikens talan i kontakter med myndigheter och utbildningsansvariga instanser, att vara kontaktorgan mellan fysiker å ena sidan och näringsliv, massmedia och samhälle å andra sidan, samt att främja internationell samverkan inom fysiken.

Ordförande: Anne-Sofie Mårtensson,  
anne-sofie.martensson@hb.se

Sekreterare: Joakim Cederkäll,  
joakim.cederkall@nuclear.lu.se

Skattmästare: Lage Hedin, lage.hedin@fysik.uu.se

Adress: Svenska Fysikersamfundet,  
Institutionen för fysik och astronomi,  
Uppsala universitet,  
Box 516, 751 20 Uppsala

Postgiro: 2683-1

E-post: styrelsen@fysikersamfundet.se

För medlemsfrågor, kontakta Lena Jirberg Jonsson, 08-411 52 80 eller Lena@chemsoc.se

## Sektioner

Inom Fysikersamfundet finns ett antal sektioner som bland annat ordnar möten och konferenser, se [www.fysikersamfundet.se](http://www.fysikersamfundet.se) för mer information.

## Kosmos

Fysikersamfundet ger ut årsskriften Kosmos. Redaktör för denna är Leif Karlsson, leif.karlsson@fysik.uu.se.

## Fysikaktuellt

Fysikaktuellt utkommer med fyra nummer per år, och distribueras till samfundets medlemmar samt till alla gymnasieskolor med naturvetenskapligt eller tekniskt program. Redaktionen består av: Sören Holst, Margareta Kesselberg, Johan Mauritsson, Dan Kiselman och Elisabeth Rachlew. Ansvarig utgivare är Anne-Sofie Mårtensson.

Kontakta redaktionen via: [fysikaktuellt@fysikersamfundet.se](mailto:fysikaktuellt@fysikersamfundet.se)

För insänt, ej beställt material ansvaras ej.

## Medlemskap

Svenska Fysikersamfundet har ca 800 individuella medlemmar samt ett antal stödjande medlemmar (företag och organisationer) och ett antal stödjande institutioner.

Årsavgiften är 400 kr, dock 250 kr för pensionärer och forskarstuderande, samt 50 kr för grundutbildningsstudenter.

För den som även vill bli individuell medlem i European Physical Society tillkommer en årsavgift på 200 kr. Stödjande medlemskap, vilket ger kraftigt rabatterat pris på annonser i Fysikaktuellt, kostar 4000 kr per år.

Bli medlem genom anmälan på: <http://www.fysikersamfundet.se/formular.html>

**Omslagsbild:** Fotot visar en extremt smalbandig laser (<10 Hz) som används till kvantoptikexperiment. Foto: Johan Mauritsson.

**Tryck:** Trydells, Laholm 2014

## Utgivningsdatum för Fysikaktuellt

Nr 2 – 2015, manusstopp 16 april. Hos läsaren 26 maj.

Nr 3 – 2015, manusstopp 5 sept. Hos läsaren 28 september.

Nr 4 – 2015, manusstopp 25 okt. Hos läsaren 1 december.

# Stödjande medlemmar

- ALEGA Skolmateriel AB  
[www.alega.se](http://www.alega.se)
- Gammadata Instrument AB  
[www.gammadata.net](http://www.gammadata.net)
- Gleerups Utbildning AB  
[www.gleerups.se](http://www.gleerups.se)
- Laser 2000  
[www.laser2000.se](http://www.laser2000.se)
- Myfab  
[www.myfab.se](http://www.myfab.se)
- VWR International AB  
[www.vwr.com](http://www.vwr.com)

# Stödjande institutioner

- Chalmers tekniska högskola – Institutionen för fundamental fysik
- Chalmers tekniska högskola – Institutionen för teknisk fysik
- Göteborgs universitet – Institutionen för fysik
- Högskolan i Halmstad – IDE-sektionen
- Institutet för rymdfysik, Kiruna
- Karlstads universitet – Avdelningen för fysik och elektroteknik
- Kungliga tekniska högskolan – Institutionen för fysik
- Kungliga tekniska högskolan – Institutionen för teoretisk fysik
- Kungliga tekniska högskolan – Institutionen för tillämpad fysik
- Linköpings universitet – Institutionen för fysik, kemi och biologi (IFM)
- Linköpings universitet – Institutionen för naturvetenskap och teknik (ITN)
- Lunds universitet – Fysiska institutionen
- Lunds universitet – Institutionen för astronomi och teoretisk fysik
- Mittuniversitetet – Institutionen för naturvetenskap, teknik och matematik
- Nordita, Nordic Institute of Theoretical Physics
- Stockholms universitet – Fysikum
- Uppsala universitet – Institutionen för fysik och astronomi

Glöm inte att anmäla adressändring till [lena@chemsoc.se](mailto:lena@chemsoc.se)

- 3 SIGNERAT  
*Anne-Marie Pendrill*
- 4-5 AKTUELLT/NOTISER
- 6-8 SOLENS LJUS  
*Dan Kiselman*
- 9-11 FOTOSYNTES  
*Villy Sundström*
- 12 FÄRG OCH VERKLIGHET  
*Eleonora Lorek*
- 13-15 SAMMANFLÄTADE  
FOTONER  
*Jenny Karlsson*
- 16-17 KORTA LASERPULSER  
*Johan Mauritsson, Per Johnsson  
och Anne L'Huillier*
- 18-19 AVHANDLINGEN  
*Christoph Heyl*
- 20-21 CHRISTOPH HEYL  
INTERVJUAS  
*Margareta Kesselberg*
- 22-23 SOLCELLER  
*Ellen Moon*
- 24-25 PORTRÄTT  
Sune Svanberg intervjuas  
*Margareta Kesselberg*
- 26-28 SYNKROTRON LJUSKÄLLA  
MAX IV-anläggningen  
presenteras  
*Sverker Werin*
- 29-30 VARDAGENS FYSIK  
Osynlig kommunikation  
*Max Kesselberg*
- 31 FYSIKALISKA LEKSAKER  
"Att stapla apelsiner"  
*Per-Olof Nilsson*

## En vacker inledning på Ljusåret 2015

När jag ser planeter förundras jag alltid över hur människor kunnat beskriva och förutsäga planeternas rörelser, baserat på observationer av ljusa punkter på natthimlen. Bilden till höger visar Venus och Merkurius strax efter solnedgång. Högre upp, i linje (men utanför bilden) kan man hitta Mars.

Teleskop gjorde det möjligt att studera allt svagare objekt på natthimlen. För 1000 år sedan publicerades Ibn Al-Haytham ett verk om optik i 7 volymer *Kitab al-Manathir* (Bok om optik). Dessa "1000 år med arabisk optik" är ett av skälen till att 2015 utsetts av Unesco till ett *Internationellt år för ljus och ljusbaserade teknologier*, ([light2015.org](http://light2015.org)). En partner till Ljusåret är projektet 1001 uppfinningar – utställningen visades på Värmlands museum redan 2013 ([1001inventions.com/sweden](http://1001inventions.com/sweden)).



*Ann-Marie Pendrill*  
Föreståndare nationellt resurscentrum för fysik  
Professor i Vetenskapskommunikation och  
Fysikdidaktik, Lunds universitet



2015 är jubileumsår för flera ljusrelaterade upptäckter: Insikten att Ljus är en vågrörelse (Fresnel, 1815), den elektromagnetiska teorin för ljusets utbredning (Maxwell, 1865), allmänna relativitetsteorin (Einstein, 1915), upptäckten av den kosmiska bakgrundsstrålningen (Penzias and Wilson, 1965) och även möjligheten att använda fibrer för optisk kommunikation (Charles Kao 1965).

I Sverige samlar Ljus2015 aktörer från många olika områden, såsom naturvetenskap, teknik, fotonik, miljöpsykologi, belysningsbranschen och Ljusdesigners, lärare, museer och science center.

Följ arbetet på [Ljus2015.se](http://Ljus2015.se) och skicka gärna information om evenemang, material och annat du vill dela med dig av.



United Nations  
Educational, Scientific and  
Cultural Organization



INTERNATIONAL  
YEAR OF LIGHT  
2015

# Singapore blir IUPAP:s nya hem

International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) bildades 1922 och har omkring 60 länder som medlemmar. Målet är att stimulera internationellt samarbete mellan fysiker. IUPAP sponsrar stora internationella konferenser, beslutar var konferenserna förläggs och utarbetar internationella överenskommelser om fysikaliska symboler och enheter. Totalt finns det också 20 olika kommissioner för olika fysikområden under IUPAP.

Vart tredje år hålls ett Generalför-samlingsmöte, och 2014 arrangerades detta på Nanyang Technological University (NTU) i Singapore. Rektor på detta prestigefulla universitet (rankat som 39 i världen och nummer ett i Asien) är sedan åtta år Bertil Andersson (tidigare bl a rektor på Linköpings universitet).

Bertil Andersson inledde IUPAP-mötet med en beskrivning av NTU och forskningens status i Singapore. NTU bildades 1955. Forskning började man inte med förrän år 2000, och i fysik startades det först 2005. Singapore storsatsar på forskningen och NTU kan rekrytera toppforskare från hela världen. T ex erbjuds man som toppforskare 800 mkr under 5 år om man accepterar att komma till Singapore. NTU ansvarar också för den allmänna lärarutbildningen i Singapore. Nyexaminerade lärare tjänar mer än nyexaminerade läkare eller advokater. Lärarna måste komma en månad varje år till NTU för att vidareutbilda sig. Singapores studenter ligger i topp i alla utvärderingar som PISA etc.

IUPAP:s sekretariat flyttar från Lon-

don till Singapore i år, och man räknar med att reducera kostnader genom detta. Sverige har under åren haft flera presidenter i IUPAP; Manne Siegbahn, Kai Siegbahn, Jan Nilsson (under 33 år!) och nu senast Cecilia Jarlskog som avgick vid Singaporemötet. Till ny president valdes Bruce McKellen, Australien.

Sex svenska fysiker blev invalda i olika kommissioner: Joakim Edsjö (C4 Astroparticle Physics), Per Olof Holtz (C8 Semiconductors), Jonas Fransson (C10 Structure and dynamics of condensed matter), Per Olof Hulth (C11 Particles and Fields), Claes Fahlander (C12 Nuclear Physics) och Lotten Glans (C14 Physics Education).

Axplock bland övriga frågor som behandlades på mötet: Antalet nomineringar till "Young Scientist" för olika konferenser har gått ner och ibland kan det var ytterst få kandidater. Man beslöt att försöka öka antalet nomineringar genom olika initiativ.

C2 kommer att tillsätta en arbetsgrupp för att mäta gravitationskonstanten G. Det finns idag olika mätresultat som skiljer sig med 40 gånger den uppskattade osäkerheten. C17:s namn ändrades från "Quantum electronics" till "Laser Physics and Photonics"

Det finns planer för ett internationellt år för ljud 2019, och en utredning tillsattes ang en ny arbetsgrupp för "Accelerator Science".

PER OLOF HULTH,  
STOCKHOLMS UNIVERSITET,  
SVENSK DELEGAT PÅ IUPAP-MÖTET

## Fysikkonferenser i Sverige

### *Statistical Physics and Mechanics of Forms and Shapes*

Stockholm 27-30 maj 2015  
[www.nordita.org/sm2015](http://www.nordita.org/sm2015)

### *Microphysics in Computational Relativistic Astrophysics*

Stockholm 17-21 aug 2015  
<http://compact-merger.astro.su.se/MICRA2015/>

### *PNGF15 – Progress in Non-equilibrium Green's Functions VI*

Lund 17-21 aug 2015  
<http://www.teorifys.lu.se/events/PNGF6/>

### *Pangborn 2015 – Pangborn 11th Sensory Science Symposium*

Göteborg 23-27 aug 2015  
<http://www.Pangborn2015.com>

## Internationellt

### *General Assembly*

Internationella astronomiska unionen. Honolulu 3-14 aug 2015  
<http://astronomy2015.org/>

### *Nordic Physics Days 2015*

Trondheim 9-12 juni. Läs mer:  
[www.ntnu.edu/physics/npd2015](http://www.ntnu.edu/physics/npd2015)

## Populärt

### *Solförmörkelse*

20 mars 2015, maximal runt kl 11  
Partiell i Sverige, total på Nordatlanten.

### *Vetenskapsfestivalen*

Göteborg 15-19 apr 2015  
<http://vetenskapsfestivalen.se>

## Ultrasnabb fotografering (femtofotografering)

Läs mer om fotografering av ljusets utbredning i ultrarapid  
<http://www.nature.com/nature/journal/v516/n7529/full/nature14005.html>

## Vinnare av FILMQUIZ i nr 4-2014

Vinnare av Max Tegmarks bok "Vårt matematiska universum" blev:

**Magnus Stenberg, Gymnasieskolan Knut Hahn i Ronneby.**

Rätt lösning: A:X B:1 C:2 D:1 E:1 F:2 G:2 H:2 I:2

## Gymnasieministern uppvaktad

Det statliga bidraget räcker ofta inte ens till för att bekosta deltagarnas resa till olympiaden! Företrädare för de organisationer som ordnar de svenska uttagningarna till bl a Biologi-, Fysik-, Kemi- och Programmeringsolympiaden, samt EUSO och IYPT uppvaktade därför i januari gymnasieminister Aida Hadzialic för att få anslaget till tävlingarna höjt. Fram till 2009 bekostade staten resor till, och deltagaravgift för, olympiaderna, men därefter har totalbeloppet legat stilla, medan antalet tävlingar som delar på kakan vuxit. Under ett antal år har därför inga elever kunnat åka till Astronomiolympiaden, och nu är också det svenska deltagandet i Biologiolympiaden hotat av nedläggning.

Organisationerna framhöll särskilt att tävlingarna driver på utvecklingsarbetet i skolan, och att det material som tas fram i samband med uttagningar och träningsläger blir en viktig resurs som kommer alla skolor till del. Mötet hölls passande nog på Malmö Borgarskola, ett gymnasium som under lång tid använt tävlingarna för att utveckla undervisningen, och bl a ordnat träningsläger för det svenska IYPT-laget.



*Gymnasieministern Aida Hadzialic visade ett genuint intresse för vetenskapsolympiader för ungdomar, och förärvades därför en guldmedalj från EUSO av Fysikersamfundets ordförande Anne-Sofie Mårtensson.*

## PRESS-STOPP: European Physical Society (EPS) sätter ljuset på Anne L'Huillier

Utmärkelsen *"EPS Emmy Noether Distinction for women in Physics"* hösten 2014 har tilldelats *Anne L'Huillier* vid Lunds universitet med motiveringen: "Anne is one of the key leaders in a field at the interface of atomic and molecular physics and advanced optics, nonlinear optics and laser physics: high-order harmonic generation (HHG) in gaseous media exposed to intense laser fields and its applications, in particular to attosecond science." Läs mer: <http://epsnews.eu/2015/01>

## Gymnasister inbjuds till Lise Meitner-dagar i oktober



*Sofia Svensson, Nea Ruth, Maja Arvola och Felix Tellander leder arbetet med Lise Meitner-dagarna.*

I oktober får Jöns Jacob äntligen en lillasyster när Kemistsamfundets årliga möte för gymnasister, Berzeliusdagarna, får en fysikmotsvarighet. Lise Meitner-dagarna är en satsning på nationell nivå som ska ge ungdomar med fysikintresse två intensiva dagar fyllda med föreläsningar, experiment och möten med fysiker.

Det har länge funnits inspirationsdagar i kemi, matematik och biologi för gymnasister, men saknats något motsvarande inom fysik. Nu är det alltså dags. Svenska Fysikersamfundet och Nationalkommittén för fysik arrangerar den 23-24 oktober i år Lise Meitner-dagar på Alba Nova i Stockholm. Till mötet inbjuds gymnasieskolor med naturvetenskapligt eller tekniskt program att skicka två elever med starkt intresse för fysik, en flicka och en pojke.

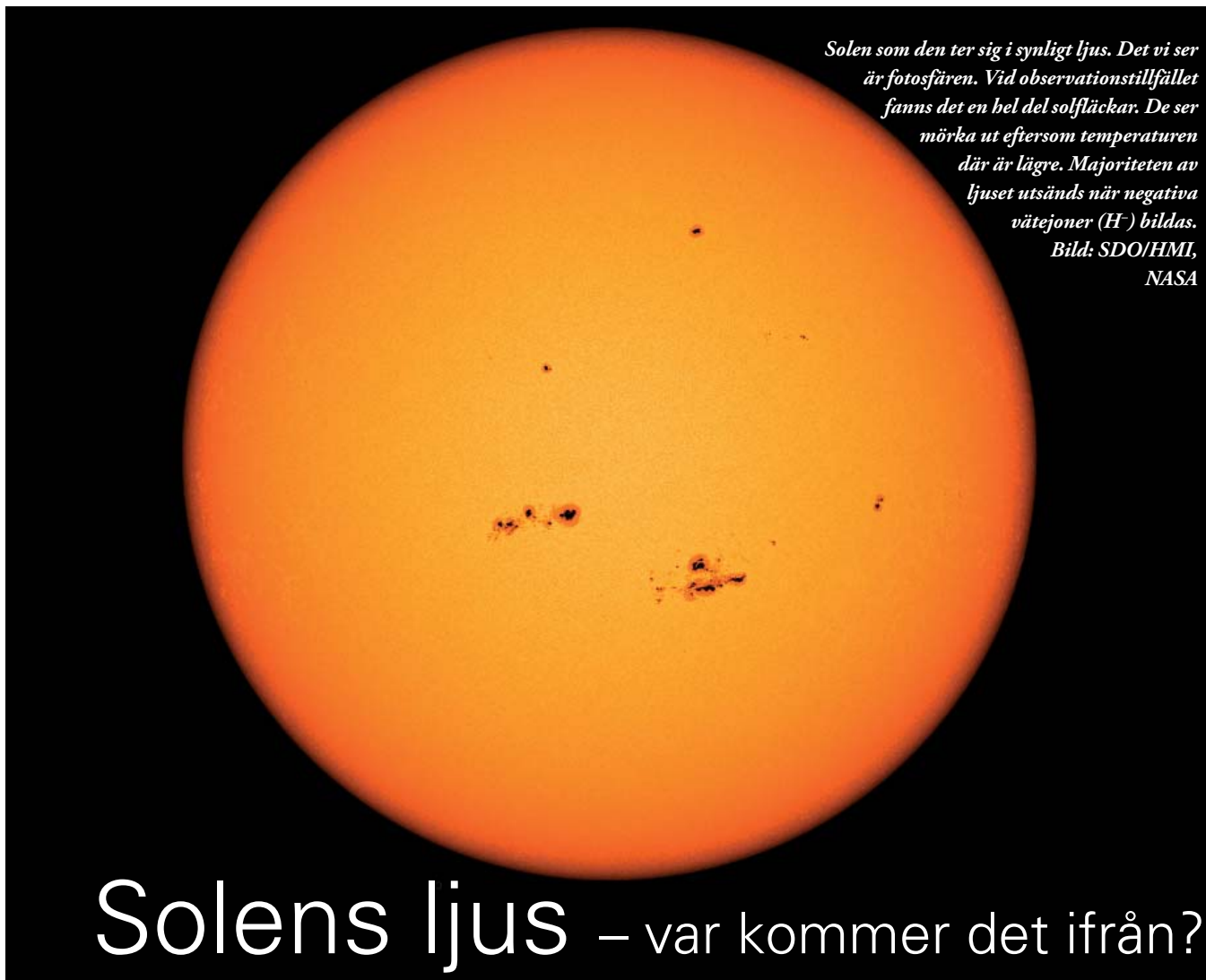
Lise Meitner-dagarna ska bli en årligen återkommande konferens med aktuell och intressant fysik i ämnets hela bredd. Det långsiktiga syftet är att öka intresset för fysikämnet och att stimulera fler elever att gå vidare till naturvetenskapliga och tekniska högskoleutbildningar. Under två dagar får eleverna via

föreläsningar ta del av nya forskningsgenombrott och få en bild av fysikens roll i samhället. På agendan finns även laborationer, möten med doktorander och en utställning där universitet och näringsliv får visa upp sig. Gymnasieeleverna bor på vandrarhem och på fredagskvällen anordnas en festlig middag. Fysikum vid Stockholms Universitet, fysikinstitutionerna vid KTH och Vetenskapens Hus står som värdar för dagarna.

Dagarna är uppkallade efter Lise Meitner, österrikisk-svensk fysiker verksam i Stockholm mellan 1938 och 1960, och en av sin tids mest framstående fysiker. Genom att namnge konferensen efter Lise Meitner vill vi uppmärksamma vikten av att fler kvinnor väljer att verka inom fysiken.

På hemsidan [www.lisemeitnerdagarna.se](http://www.lisemeitnerdagarna.se) finns mer information, och här kan gymnasieskolor också anmäla intresse för att skicka deltagare. Kontakta gärna projektgruppen om du har några frågor:

**Sofia Svensson**, Projektledare  
[sofia.svensson@lisemeitnerdagarna.se](mailto:sofia.svensson@lisemeitnerdagarna.se)  
**Nea Ruth**, Projektgruppen  
[nea.ruth@lisemeitnerdagarna.se](mailto:nea.ruth@lisemeitnerdagarna.se)



*Solen som den ter sig i synligt ljus. Det vi ser är fotosfären. Vid observationstillfället fanns det en hel del solfläckar. De ser mörka ut eftersom temperaturen där är lägre. Majoriteten av ljuset utsänds när negativa vätejoner ( $H^-$ ) bildas.  
Bild: SDO/HMI, NASA*

# Solens ljus – var kommer det ifrån?

**Jag vet! I solen pågår fusionsreaktioner där väte omvandlas till helium. Därför lyser den!**

Fel! Nej, det är ju förstås inte helt fel. Men inte rätt heller. Vi kan inte se in till solens centrala delar där kärnreaktioner har som nettoresultat att väte blir helium. Solskenet kommer inte direkt därifrån. I kärnreaktionerna frigörs neutriner och energi. Men neutriner kan vi inte se och resten av energin släpps loss i form av gammastrålning och termisk energi hos jonerna och elektronerna i solens inre. Denna energi har lång väg att gå innan den kan sändas ut i rymden i form av synligt ljus.

Till att börja med transporteras energin genom strålningsprocesser. Gammastrålningen far iväg med ljusets hastig-

het men kommer bara några millimeter innan den växelverkar med en elektron eller en jon. Följden blir ett slumpmässigt studsande hit och dit. Men sakta sakta sker en nettotransport utåt genom solen. Tidsskalan för detta är lång, betydligt mer än tiotusentals år. Ju längre från solens centrum vi kommer desto lägre blir både temperatur och täthet och ljusets spektralfördelning anpassar sig till temperaturen. Materiens förmåga att absorbera ljus förändras allteftersom jonisationsgraden minskar. Till slut når vi regioner där gasen blir så pass ogenomskinlig att strålningstransporten blir alltför ineffektiv. Skiktningen blir instabil och konvektion startar. Konvektionen innebär att hetare gas stiger uppåt och kallare gas faller nedåt. Detta är ett effektivt sätt att transportera

energi och tidsskalan för att nå ytan är bara någon månad. Solens konvektionszon börjar på ett avstånd av 0,7 solradier från centrum och sträcker sig upp till strax under den synliga ytan.

Under hela resan ut genom solen har temperatur och täthet sjunkit. Till slut blir gasen så genomskinlig att strålningen frikopplas från materien och kan fly ut i rymden. Här, i de lager vi kallar fotosfären, bildas solljuset. Fotosfären kan kallas solens synliga yta men den utgör ett lager som är ungefär 500 km tjockt. (Det exakta värdet är blott en definitionsfråga.) Detta är inte mycket jämfört med hela solen och det är därför som solskivan ger ett så skarpt och avgränsat intryck och inte ser suddig ut, som man kanske skulle vänta sig från ett gasmoln.

Vätets ljusabsorption vid förhållanden typiska för solfotosfären (temperatur 6000 K,  $7 \cdot 10^{19}$  fria elektroner per  $m^3$ ). Enheten är absorptionstvärsnitt i kvadratmeter normaliserat per väteatom. Processer involverande negativa vätejoner dominerar över hela det stora spektralintervall som visas. Jonisationskanterna – som ligger där fotonenergin precis räcker för att jonisera en exciterad nivå – blir bara små hack i den sammanlagda kurvan. Vid  $1,6 \mu m$  har kurvan ett minimum. Just vid denna våglängd kan man se allra längst in i solen.

Vad består fotosfären av? Räkna man partiklar av alla slag finner man att de huvudsakliga beståndsdelarna är väteatomer och fotoner. Man skulle då kunna tro att det är väteatomerna som står för huvuddelen av absorberandet och emitterandet av ljus. Men för att kunna vara verksamma i det synliga området av ljusspektrum måste väteatomerna exciteras upp till sin andra exciterade nivå, med huvudkvantalet  $n = 3$ . Härifrån utgår Paschen-kontinuet och dessa atomer kan joniseras av strålning med våglängder kortare än 821 nm. Temperaturen i fotosfären är emellertid alltför låg för att detta ska ske i större omfattning. Det är mindre än en miljarddel av väteatomerna som är så pass högt exciterade i ett givet ögonblick.

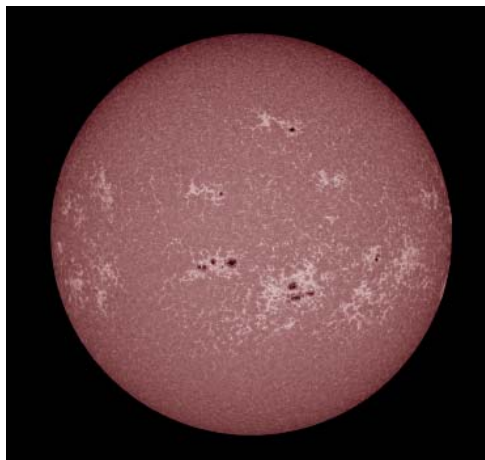
Var kommer då solens ljus ifrån? Man trodde först att atomer och joner från andra grundämnen än väte var ansvariga. Men när man uppskattade hur deras sammantagna ljusabsorptionsförmåga kunde väntas variera med våglängd stämde det inte med observationerna. Den sammantagna fotojonisationen från dem borde öka kraftigt mot kortare våglängder, men observationerna tydde istället på en kurva som var någorlunda konstant över våglängd i det synliga området.

Den korrekta lösningen på detta solmysterium föreslogs av Rupert Wildt år 1939. Han noterade att det borde finnas en del fria elektroner i den fotosfäriska gasen. Man kunde förvänta sig att vissa väteatomer binder en elektron till sig och bildar den negativa vätejonen  $H^-$ . Denna jon stöter vi inte på så ofta i kemilabbet, men den misstänktes kunna spela en viktig roll i solens fotosfär. Den är nämligen väldigt

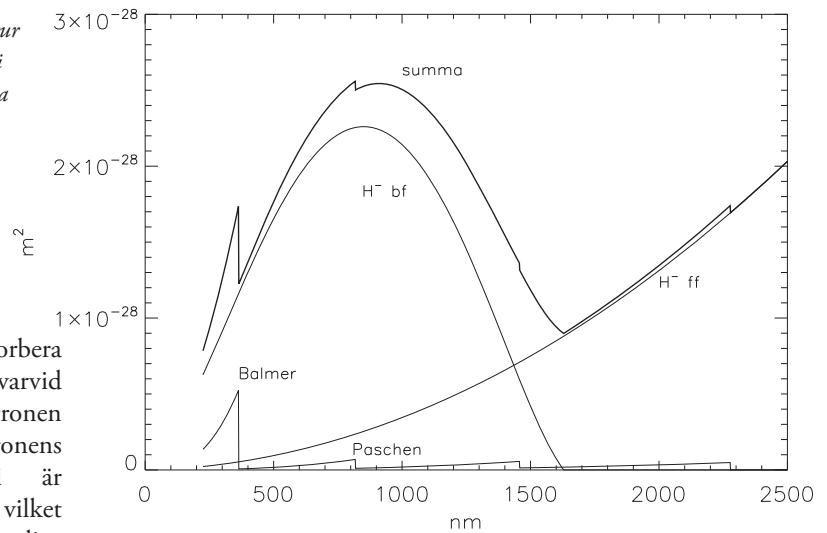
bra på att absorbera synligt ljus varvid den extra elektronen slits bort. Elektronens bindningsenergi är bara 0,75 eV vilket betyder att allt ljus med våglängd kortare än  $1,6 \mu m$  kan jonisera  $H^-$ .

Misstankarna kunde slutligen bekräftas 1946 genom detaljerade kvantmekaniska beräkningar av Subramanyan Chandrasekhar och Frances Breen. Beräkningarna visade hur  $H^-$  absorberade ljus och att våglängdsberoendet var precis det som observationer av solen fordrade för att kunna förklaras.

De elektroner som behövs kommer främst från lättjoniserade och någorlunda vanligt förekommande metaller, som magnesium, järn och kisel. (Vadå kisel? Det är väl ingen metall! Jo, i astrofysiken är alla grundämnen utom väte och helium metaller.) Jonisationsgraden är



Solen vid våglängden 170 nm. Här ser man främst de övre delarna av fotosfären. En stor del av ljuset kommer från rekombinerande kisel- och järnatomer. Bild: SDO/AIA, NASA

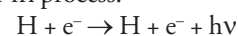


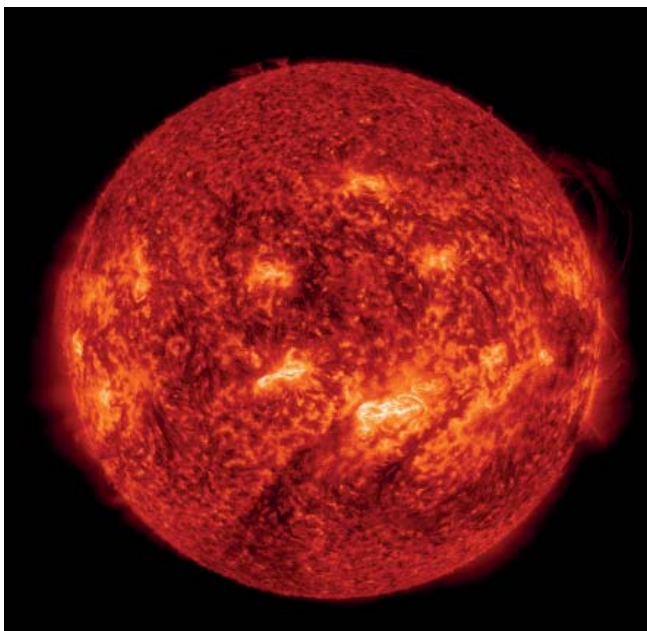
mycket temperaturkänslig och detsamma gäller då förekomsten av  $H^-$ . Detta är en viktig anledning till att fotosfären är så tunn och solranden så skarp. Kopplingen mellan temperatur och gasens förmåga att absorbera ljus (opaciteten) är stark: opaciteten ökar som nionde potensen av temperaturen. En liten temperatursänkning gör gasen genomskinligare varvid den svalnar än mer genom strålningsförluster – och tvärtom vid en temperaturhöjning.

Varje process som innebär en ljusabsorption kan förstås gå åt andra hållet varvid ljus emitteras. Eftersom  $H^-$  är den främsta ljusabsorberaren så är den också den främsta ljusemitteraren. Varför då? Det låter lite motsägelsefullt. Jo, förhållandena i solfotosfären är trots allt inte så långt från de som råder vid termodynamisk jämvikt vid den aktuella temperaturen – och i jämvikt balanseras varje process av sin motsats. För varje absorption av en foton kan man vänta sig en emission genom den omvända processen. Detta innebär att majoriteten av de fotoner som solen sänder ut i det synliga området blir till när en väteatom binder till sig en extra elektron.

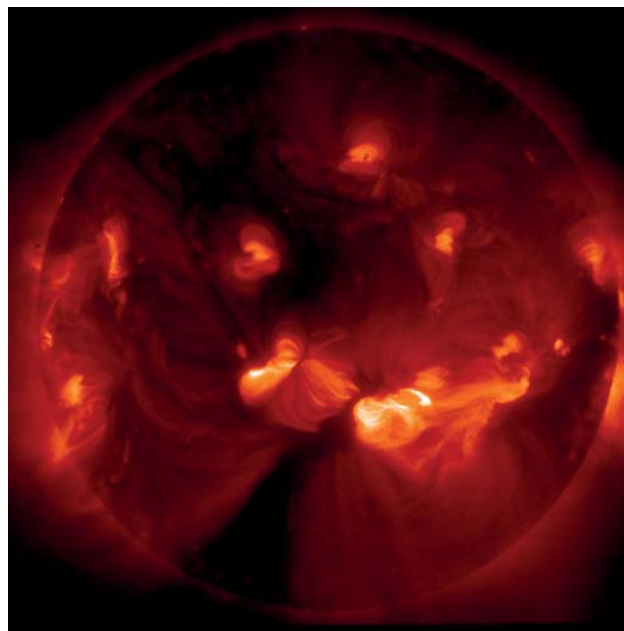


En väteatom som kolliderar med en elektron utan att den senare binds kan också lätt absorbera infrarött ljus och i den omvända processen kan systemet utsända ljus. Det rör sig då om en så kallad fri-fri process.





*Solen vid våglängden 30,4 nm där en spektrallinje från enkeljoniserat helium (He II) återfinns. Ljuset utsänds från områden där temperaturen är ungefär 60000 K vilket motsvarar det vi kallar övre kromosfären och den så kallade övergångszonen. Eftersom vi inte kan se ultraviolett ljus är bilden förstas färglagd. I många populära framställningar av solen ser den ut just så här. Uppenbarligen är just detta våglängdsband särskilt inspirerande för konstnärer. Bild: SDO/AIA, NASA*



*Solen porträtterad i mjuk röntgenstrålning av teleskopet XRT på det japanska rymdobservatoriet Hinode. Bild: ISAS/JAXA Hinode*

Detta betyder att också i den infraröda delen av solspektrum kommer de flesta fotonerna från H<sup>-</sup>.

Solskenet som tittar in genom vårt fönster föds alltså när väteatomer och elektroner tillfälligt förenas i fotosfären. En del av solvärmen vi känner förmedlas av fotoner som sänds ut när en väteatom och en elektron tillfälligt krockar utan att bindas vid varandra.

Vilka fysikaliska processer på solen ska vi då skylla på när vi blir solbrända?

Solbränna orsakas av den kortvågiga delen av solspektrum. Solljusets intensitet sjunker mot kortare våglängder, samtidigt som jordatmosfärens absorption ökar. Den medicinska effekten blir större vid kortare våglängder. Sammantaget ger detta ett effektivitets-maximum vid ca 310 nm. När vi går vi mot kortare våglängder i solspektrum minskar betydelsen av H<sup>-</sup> i fotosfären. Spektrallinjer – diskreta övergångar i allehanda atomer och molekyler – blir alltmer betydelsefulla. Vid våglängden 364 nm börjar Balmerkontinuet vilket betyder att väteatomer exciterade till nivån n=2 kan fotojoniseras (och i den inversa processen sker re-

kombination med utsändande av ljus). I UV-B området mellan 315 och 280 nm delar dessa tre processer: H<sup>-</sup>, H och spektrallinjer på huvudansvaret för solljuset. Om någon sedan skulle vara olycklig nog att utsättas för solens UV-C-strålning, vid och bortom 250 nm, så står faktiskt re-kombinerande magnesium för en stor del av det för hälsan mycket skadliga ljuset. Emellertid skyddar oss ozonlagret i vanliga fall helt från detta.

Temperaturen i fotosfären ligger i intervall 4000 – 7000 K. Strålningen därifrån är inte helt olik svartkroppsstrålning och då förstår man att ljusintensiteten måste sjunka i ultraviolett och vidare mot allt kortare våglängder. Men observerar man solen bortom 100 nm våglängd, i extremt ultraviolett och röntgen, uppmäter man strålning som är starkare än vad man väntar sig från fotosfäriska temperaturer. Denna strålning kommer inte heller därifrån utan från de yttre atmosfärslager som kallas kromosfären och koronan.

Koronagasen är het med en temperatur på flera miljoner kelvin. Trots att den samtidigt är mycket tunn överglänser den därför fotosfären i röntgenstrålning. På

en röntgenbild av solen är själva solskivan mörk. Den omges av en diffus röntgen-slöja som här och var koncentreras till tussar och bågformationer. Man anar där strukturen hos det magnetfält som styr och håller fast koronans heta plasma.

Hur koronan kan hålla sig så het har varit en gåta i 70 år. Värme kan ju inte spontant flöda från den betydligt kallare fotosfären där under. På något sätt pumpas energi från solens inre för att deponeras i de övre atmosfärslagren. Magnetfältet måste spela en central roll, men detaljerna i dessa processer är inte klarlagda.

Mellan koronan och fotosfären ligger kromosfären som främst lyser i ljuset av starka spektrallinjer och i ultraviolett. Kromosfären är dynamisk och långt från jämvikt. Ibland blixtrar det till här när en magnetisk urladdning i koronan ger upphov till en så kallad flare. Då alstras även hård röntgenstrålning och till och med gamma. Solen kan utsända alla sorters ljus och varje våglängd har sin egen historia att berätta.

DAN KISELMAN  
INSTITUTET FÖR SOLFYSIK  
STOCKHOLMS UNIVERSITET



# Från fotosyntes till solbränsle med femtosekundpulser och frielektronlaser

På en timme strålar solen in solenergi mot jorden som motsvarar hela jordens totala energiförbrukning under ett år. Om vi kunde omvandla bara en liten del av all denna energi till elektricitet och bränsle skulle ett stort steg vara taget mot en hållbar energiförsörjning. Vår energiförbrukning utgörs till stor del (ca 30 % i Sverige) av olika bränslen som vi behöver för transporter, uppvärmning av bostäder och i industrin. Att omvandla solljus till bränsle i en direkt process liknande fotosyntesen vore ett effektivt sätt att framställa bränsle utan mellansteg.

För att förstå hur detta kan låta sig göras tittar vi lite närmare på fotosyntesen. Fotosyntesen i gröna växter kan liknas vid en fabrik där råvarorna vatten och koldioxid förädlas till kolhydrater (biomassa) i ett maskineri som drivs av ljusenergi. Maskineriet är komplicerat och består av många delar och delprocesser. Energin i ljuset överförs till elektroner som extraheras från vattnet; de energirika elektronerna används sedan för att driva de kemiska reaktioner som bildar de energirika kolhydratmolekylerna. På detta sätt har ljusenergi omvandlats och lagrats i ett bränsle (biomassa).

Maskineriet för genereringen av de energirika elektronerna är ett protein kallat fotosystem 2 (PS2) som innehåller

ett stort antal klorofyllmolekyler (Figur 1, sid 10) och ett unikt metall-kuster bestående av fyra manganatomer och en kalciumatom. Huvuddelen av klorofyllmolekylerna samlar in ljuset och levererar energin till det sk reaktionscentrat som består av några specialicerade klorofyllmolekyler i proteinets mitt, där ljusenergin omvandlas till energirika elektroner. Dessa används för att producera energirika kolhydrater (bränslet). Elektronerna som reaktionscentrum gav ifrån sig för kolhydratframställning ersätts av elektroner som extraheras från vattnet med hjälp av mangan-kalcium klostret, det s.k. vattenspjälkande komplexet ("water splitting complex", WSC). Energitransporten genom proteinet och omvandlingen till elektroner sker på femtosekund- och pikosekund-tidskalan och har studerats i detalj med hjälp av ultrasnabb laserspektroskopi. De höga reaktionshastigheterna resulterar i nära hundra procentig verkningsgrad för omvandlingen av ljus till elektroner. Detta skiljer sig drastiskt från den låga, ca en-procentiga, verkningsgraden för den totala fotosyntesprocessen ljus till kolhydrat.

Att använda biomassa som bränsle, eller låta fotosyntetiska organismer framställa biobränsle är därför

## Faktaruta

Förenta Nationernas klimatpanel, IPCC, påminner oss gång efter annan om förändringarna i vårt klimat på grund av vår användning av fossila bränslen – olja, kol och naturgas. Koldioxidhalten i atmosfären har nu nått en historiskt hög nivå på över 400 ppm – aldrig tidigare på hundratals-tals år har CO<sub>2</sub>-halten varit högre än 350 ppm. Detta orsakar stigande medeltemperatur, höjda havsnivåer och smältande inlandsisar. För att hejda denna farliga utveckling måste vi avsevärt reducera vår användning av fossila bränslen och gå över till förnyelsebara bränslen utan nettoutsläpp av koldioxid. Vattenkraft, vindkraft, biomassa, kärnkraft är exempel på CO<sub>2</sub>-fria energislag, men de är antingen otillräckliga eller icke förnybara.

# TEMA: LJUS

inte nödvändigtvis det effektivaste sättet att utnyttja solenergi. Om vi kunde utnyttja de energirika elektronerna genererade i en process liknande den i PS2 för direkt framställning av ett enkelt bränsle i några få reaktionssteg skulle en mycket högre verkningsgrad kunna erhållas. Reduktion av protoner till vätgas, eller koldioxid till metanol skulle kunna vara sådana reaktioner.

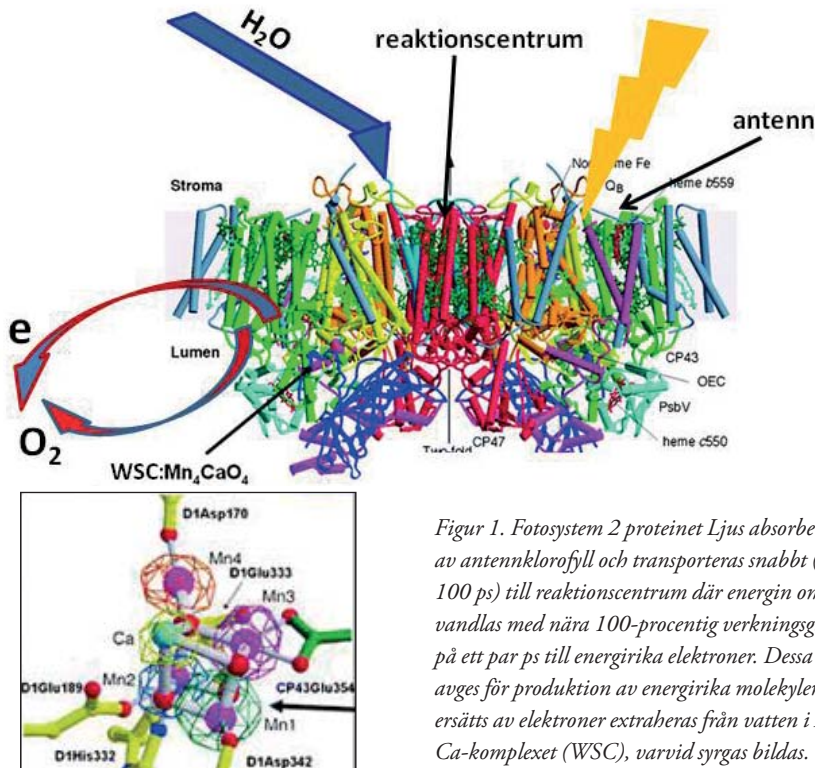
Figur 2 illustrerar en solbränslecell för framställning av vätgas i två katalytiska processer inspirerade av fotosyntesen. I den ena halvan av cellen driver en "sensitizer" (motsvarigheten till reaktionscentrum i PS2) extraktionen av elektroner från vatten med en katalysator (motsvarigheten till WSC i PS2). De extraherade elektronerna utnyttjas i den andra cellhalvan till ljusdriven reduktion av pro-

toner med hjälp av en annan katalysator (PRC – "proton reduction catalyst"). Många forskare världen över arbetar hårt för att nå detta mål. Konsortiet för artificiell fotosyntes (CAP) med forskare vid Uppsala universitet, KTH och Lunds universitet är en av föregångarna inom området sedan starten 1994 och idag arbetar ca 50 studenter och forskare inom projektet.

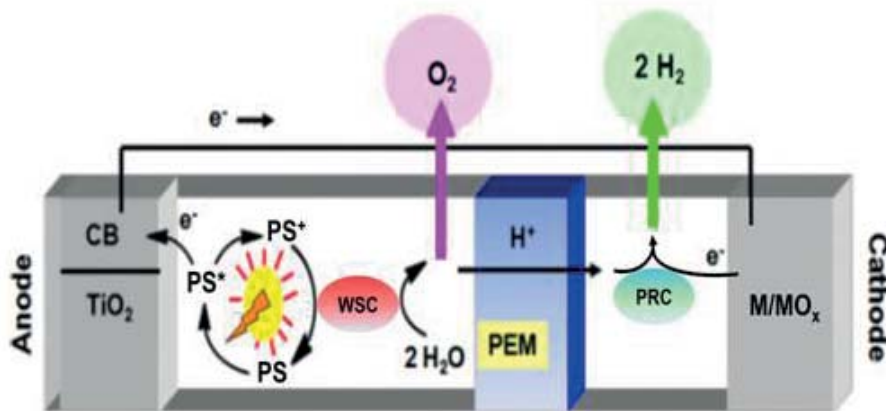
Idag finns fungerande forskningsprototyper av de två halvcellerna, men ännu ingen komplett solbränslecell. Mycket forskningsarbete återstår för att utveckla effektiva, hållbara och billiga sensitizers och katalysatorer av material som inte innehåller sällsynta eller ädla grundämnen. Detta är en stor utmaning som kräver samarbete mellan experter från många delar av kemien, syntes av nya molekyler och material, karakterisering av struktur och funktion, kvantkemiska beräkningar. I vår egen forskning i Lund använder vi olika former av ultrasnabb spektroskopi för att studera de ljusdrivna processerna som börjar på femtosekunds-skalan men slutar först efter millisekunder eller ännu längre.

Frielektronlaser (FEL) för generering av femtosekunderöntgenpulser är nya redskap i dessa studier (figur 3). Med sådana pulser kan ögonblicksbilder tas av en katalytisk reaktion för att sammanfogas till en sekvens som likt en film beskriver hela förloppet. Idag finns två sådana anläggningar i drift i världen, i Stanford, USA (LCLS) och utanför Osaka i Japan (Sacla), och fler är under konstruktion.

Figur 4 illustrerar våra resultat från experiment med frielektronlasern i Japan på ett modell-katalytiskt komplex bestående av ett ljusabsorberande Ru-komplex kopplat till ett Co-komplex via en brygga av kol, kväve och väteatomer. Ru-komplexet motsvarar reaktionscentrum i PS2 och ett modifierat Co-komplex kan ges katalytisk funktion och därmed tex generera vätgas. Ljusabsorption i Ru-komplexet initierar ultrasnabb (< 50 fs) elektronöverföring till bryggan som sammanbinder de två metallkomplexen. Något senare efter ca 0.5 ps anländer elektronen till Co-komplexet som reduceras från  $Co^{3+}$  till  $Co^{2+}$  och befinner sig



Figur 1. Fotosystem 2 proteinet Ljus absorberas av antenklorofyll och transporteras snabbt (ca 100 ps) till reaktionscentrum där energin omvandlas med nära 100-procentig verkningsgrad på ett par ps till energirika elektroner. Dessa avges för produktion av energirika molekyler men ersätts av elektroner extraheras från vatten i Mn-Ca-komplexet (WSC), varvid syrgas bildas.



Figur 2. Solbränslecell. Ljus absorberas i en fotosensitizer (PS) som avger elektroner till en titandioxidelektrod (anod). Dessa ersätts genom vattenspjälkning (WSC = water splitting catalyst) varvid syrgas och protoner bildas. Elektronerna leds till katoden (en metalloxid) där ännu en ljusdriven katalysator (PRC = proton reduction catalyst) reducerar protonerna bildade vid vattenspjälkningen och bildar vätgas.



Figur 3.  
Frielektronlasern  
vid LCLS i Stanford.  
Copyright: Kelly Gaffney  
SSRL Associate Laboratory Director  
Photon Science Associate Professor  
SLAC National Accelerator Laboratory  
Stanford University

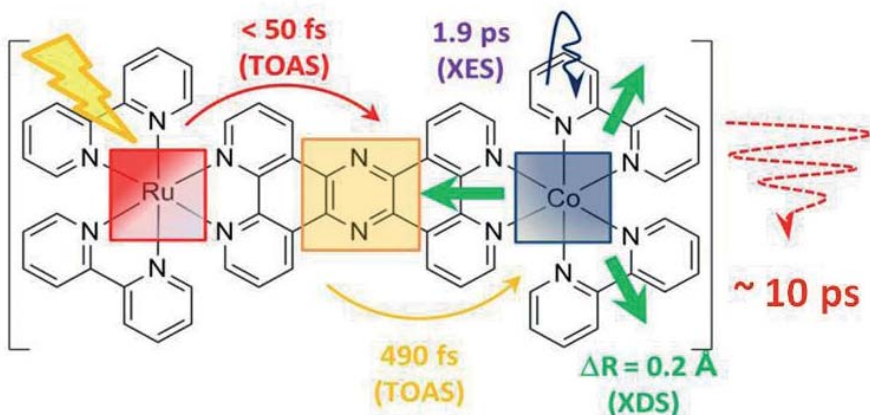
i ett exciterat spinnstillstånd. Efter ytterligare ca 2 ps byter elektronen spinnriktning och är därmed i sitt grundtillstånd. Elektronens lokalisering och ändring av spinnstillstånd resulterar i en sträckning av Co-kväve bindningarna med 0.2 Å. Resultaten i figur 4 är intressanta av två anledningar. De visar att vi med dessa nya metoder kan karakterisera alla de reaktionssteg man kan förvänta sig i en fullständig ljusdriven katalytisk process på

den ultrasnabba molekylära tidskalan – elektronöverföring, förändring av oxidationstillstånd, ändring av elektronspinn, strukturförändring. Vi har därmed ett synnerligen kraftfullt instrument för studier av många slags kemiska reaktioner, och fotokatalys i synnerhet.

En andra viktig slutsats är att hela det katalytiska förloppet sker mycket snabbare än molekylens värmeavgivning till omgivningen. Därmed lagras ljusenergin

optimalt i elektronen på Co-komplexet. I ett modifierat komplex med katalytisk aktivitet skulle därför elektronens energi och därmed ljusenergin kunna utnyttjas maximalt för att driva tex produktion av vätgas.

Vi planerar nu att använda dessa metoder på mer funktionella katalytiska system och därmed bidra med kunskap som kan leda till bättre katalysatorer och som slutmål praktiskt användbara material och utrustning för solbränsleproduktion.



Figur 4. Ru=Co modellcomplex för studier av fotokatalys. Ru-komplexet absorberar en femtosekundljuspuls och initierar en sekvens av elektronöverföring (< 50 och 490 fs), ändring av elektronspinn (1.9 ps), strukturförändring (0.2 Å) och till sist avgivning av överskottsenergi (10 ps). Förkortningarna inom parentes anger använd mätmetod (TOAS = Transient Optical Absorption Spectroscopy; XES = X-ray Emission Spectroscopy; XDS = X-ray Diffuse Scattering).

VILLY SUNDSTRÖM  
KEMISK FYSIK  
LUNDS UNIVERSITET

**Att Läs:**

1. D. J. Vinyard et al. Annu. Rev. Biochem. 82 (2013) 577
2. V. Sundström et al. J. Phys. Chem. 103(1999)2327-2346
3. N. Nelson and C. F. Yocum. Annu. Rev. Plant Biol. 57 (2006) 521
4. A. Magnuson et al. Acc. Chem. Res. 42 (2009) 1899
5. V. Sundström. Femtobiology. Ann. Rev. Phys. Chem. 59 (2008) 53
6. S. Canton et al. Visualizing the Nonequilibrium Dynamics of Photoinduced Intramolecular Electron Transfer with Femtosecond X-ray Pulses. Submitted 201409, Nature Communications In press

”Var är jag någonstans?” undrar Alice när hon hamnar i Underlandet. Men behöver man hamna i Underlandet för att ställa sig den frågan? Är inte den vanliga verkligheten minst lika förundrande? Är det inte för att försöka besvara frågan – vilken verklighet är det vi har omkring oss – som vi sökt oss till fysiken?

Består verkligheten verkligen av saker som grönt gräs, vita moln och rosa blommor som i bilden eller består den egentligen av någonting annat? Var vi är någonstans verkar vara en grundläggande fråga för vår tillvaro. Frågan är intressant också för att vetenskapen beskriver en ganska annorlunda verklighet än den vi intuitivt tror att vi har runt omkring oss.

Ett sätt att närma sig frågan är att fokusera på vad vi ser, och då framför allt då på färger. Flera framstående fysiker har menat att objekten omkring oss märkligt nog saknar färg. ”Färg” används då i den vardagliga bemärkelsen, vad vi vardagligt menar när vi säger ”blå”, ”röd” och så vidare. Newton konstaterade att ljusstrålar i sig själva inte är färgade[1]. Galilei skrev att färger bara finns i våra medvetanden och att om allt liv skulle upphöra skulle färgerna göra detsamma[2]. Detta är också hållningen inom modern hjärnforskning. Flera neurobiologer och psykologer menar att hjärnan skapar färg[3,4], att färger inte är en egenskap hos objekt eller ljus och att det kan finnas ljus av olika våglängder oberoende av observatörer men inte färger oberoende av en observatör[5]. Medan våglängd är en egenskap hos ljuset skapas alltså färger av vår hjärna.

Ett sätt att förstå att färger helt och hållet skapas av vår hjärna är att jämföra dem med smärta. På samma sätt som smärtan du känner om du trycker en pennspets mot din handflata inte är en egenskap hos pennan är inte det rosa i bilden på denna sida en egenskap hos pappret eller hos det från pappret reflekterade



Foto: Johan Mauritsson

ljuset. Den rosa färgen uppstår helt och hållet i ditt medvetande. Visst reflekterar pappret ljus av olika våglängder, men detta är i sig färglöst.

Färgerna vi ser omkring oss finns på en viss plats i vårt synfält. Att hjärnan skapar färgerna vi ser – vad säger det om platserna vi ser? Om färgerna är skapade av vår hjärna bör rimligtvis de platser i synfältet som bär färgerna också vara skapade av hjärnan. Detta betyder att hela vår visuella värld, det vill säga det vi ser, helt och hållet är konstruerat av vår hjärna. Kanske dock baserat på vissa fysiska input som ljus, som träffar våra ögon.

Det är ofta evolutionära skäl som framförs till varför vi har vår syn. En etablerad hållning är att det vi ser, för att tjäna sitt syfte, måste ”likna” verkligheten[5]. Kognitionsvetaren Donald Hoffman menar däremot att det vi upplever sannolikt inte, på evolutionära grunder, liknar den objektiva, observatörs-oberoende, världen[6]. Han talar om våra perceptuella erfarenheter som användargränssnitt. Precis som du kommunicerar med datorns hårdvara genom att klicka på ikoner på en datorskärm så interagerar vi med verkligheten genom det användargränssnitt som hjärnan skapar. Ett effektivt användargränssnitt behöver inte, menar han, likna det som skall representeras. Det kan, och bör, förenkla vissa saker för oss. En fil-ikon på datorskärmen liknar inte alls själva filen. Fil-ikonen är kanske rektangulär medan filen är en sekvens av

spänningar eller magnetfält. På samma sätt behöver inte de saker vi ser, menar Hoffman, likna det som finns i verkligheten.

Världen vi har omkring oss är alltså inte det vi ser. Till exempel verkar den vara färglös. Dessutom kanske det vi ser inte ens behöver likna verkligheten. Då aktualiseras frågan: vad finns därute? Vad finns inom de närmaste två metrarna omkring dig? Vad är detta Underland egentligen för något?

Fysikens roll att beskriva naturen så objektivt som möjligt blir på så sätt tydligare när vi inte helt kan lita på våra sinnen för åtkomst av verkligheten omkring oss. Det är också intressant att fundera på i vilken mån vår fysikaliska beskrivning av verkligheten präglas av våra vardagliga sinnesupplevelser. Det är spännande att exakt vad vi har omkring oss de närmsta metrarna fortfarande är ett mysterium.

ELEONORA LOREK  
LUNDS UNIVERSITET

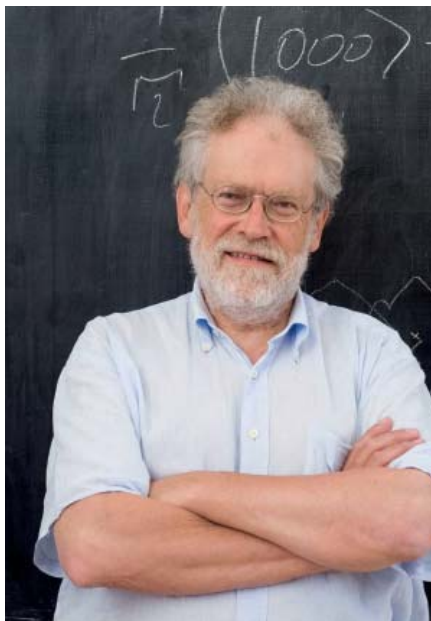
#### Referenser:

- [1] I. Newton. Optics. 3:rd edition. Addison-Wesley, 1721.
- [2] G. Galilei. The Assayer. 1623.
- [3] R. Menzel and W. Backhaus. Conclusions from color-vision of insects. Behavioral and Brain Sciences, 15:28-40, 1992.
- [4] S. Zeki. Colour coding in the cerebral cortex: The reaction of cells in monkey visual cortex to wavelengths and colours. Neuroscience, 9:741-65, 1983.
- [5] S. E. Palmer. Vision science: Photons to phenomenology. MIT Press, 1999.
- [6] D. D. Hoffman. Conscious realism and the mind body problem. Mind and Matter, 6:87-121, 2008.

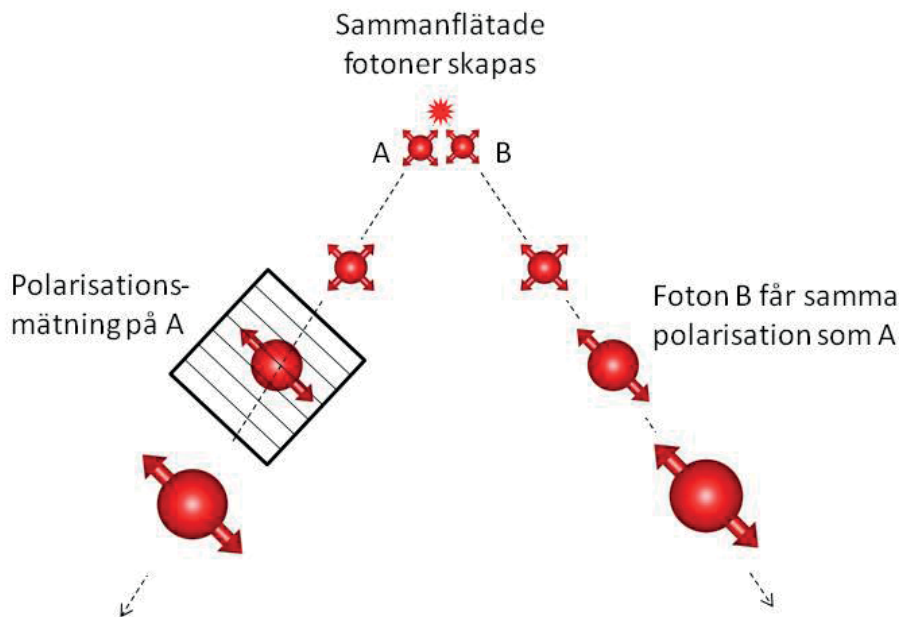
# Kvanta av ljus visar en förvånande värld

Fotoner, energiknippen av ljus som färdas med nära 300 000 000 m/s, har visat sig användbara för att testa några av de mest grundläggande frågorna om världen vi lever i. Resultaten har stora filosofiska implikationer: Finns världen runt oss, även då vi inte observerar den?

En grupp fysiker ledda av Anton Zeilinger från Österrike har sedan några år tillbaka tillbragt en stor del av sin tid på kanarieöarna. Semester? Nej, de skickar fotoner, ljusets minsta beståndsdelar, mellan två öar, La Palma och Teneriffa.



Anton Zeilinger



Fotonerna skapas i par, på ett sätt som gör att de är sammanflätade.

Sammanflätning innebär att fotonerna är relaterade till varandra på ett speciellt sätt. I det här fallet är fotonerna skapade så att de har samma polarisation, men samtidigt är polarisationen obestämd. Om vi mäter polarisationsriktningen för en av fotonerna, då vet vi genast polarisationen hos den andra fotonen också.

Enligt kvantmekaniken är polarisationen genuint obestämd innan mätningen görs, d.v.s. fotonerna har ingen förutbestämd polarisationsriktning. När vi mäter polarisationen hos en av fotonerna får den andra fotonen genast samma polarisation, oberoende av hur långt bort den befinner sig. Det innebär att en mätning på en plats omedelbart får konsekvenser för en mätning som sker på en helt annan plats, flera meter, kilometer eller ljusår bort.

*Two photons with entangled polarization move in opposite directions. At a certain point, photon A passes through a polarizer, where it is either transmitted or reflected depending on its polarization direction. At the same time, photon B also gets the same polarization direction as A.*

Sammanflätning är ett filosofiskt knepigt fenomen som har förbryllat forskare under lång tid. Vad är det som får en foton att plötsligt bestämma sig för vilken polarisation den har, då vi gör en mätning flera kilometer bort? Skickas det en signal mellan de två fotonerna som informerar om vilken polarisation de ska ha? Den signalen måste i så fall färdas snabbare än ljusets hastighet, vilket enligt Albert Einsteins relativitetsteori leder till paradoxer som involverar resor bakåt

## TEMA: LJUS

i tiden och rubbar själva begreppen orsak och verkan. Men hur kommunicerar fotonerna om de inte skickar signaler mellan varandra?

Denna så kallade spöklika växelverkan mellan partiklar upprörde Einstein så mycket att han ville förkasta hela kvantmekaniken. I en artikel av Einstein, Podolsky och Rosen från 1935 med titeln "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete" [1] argumenterar författarna för att kvantmekaniken inte är fullständig, det finns "gömda variabler", mer information om verkligheten, som kvantmekaniken inte inkluderar.

Einstein, Podolsky och Rosen menar att när vi gör en mätning får vi information om en egenskap som redan existerar hos ett föremål, även innan vi gör mätningen. Polariseringsriktningen kan alltså inte vara "genuint obestämd" innan mätningen sker. Den kvantmekaniska teorin innehåller inte tillräcklig information om ett tillstånd innan det mäts.

Einsteins antaganden om verkligheten kallas lokal realism. Realism innebär att det finns en verklighet "där ute" som vi upplever och får information om genom våra sinnen och genom mätningar vi gör. Egenskaper hos föremål och partiklar existerar oberoende av om vi mäter dem eller inte. "Lokal" innebär i det här fallet att en händelse på en plats inte kan påverka händelser på andra platser om det inte skickas någon typ av signal mellan platserna.

Jag, och jag tror de flesta människor, har intuitivt en verklighetsuppfattning som stämmer överens med lokal realism. Jag antar att min dator fortfarande är fyrkantig och svart, även då jag vänder ryggen till. Jag antar också att det här textdokumentet inte kan förändras, om det inte skickas några som helst signaler till datorn.

Nästan 30 år efter att den så kallade EPR (Einstein Podolsky Rosen) paradoxen publicerades kom en spännande uppföljning som skulle förflytta den filosofiska debatten in i labbet. Den irländske fysikern John Stewart Bell visar i "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox" [2] att det är möjligt att testa antagandet om

lokal realism experimentellt. Han visar att kvantmekanikens förutsägelser går emot de båda antagandena om att partiklars egenskaper finns där, även innan vi mäter, och att två partiklar bara kan dela information om det går en signal mellan dem. Det går att konstruera vissa experiment och situationer där kvantmekaniken förutsäger ett mätresultat som är omöjligt om lokal realism gäller.

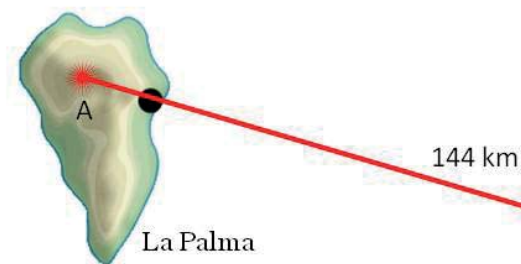
På kanarieöarna har forskarna lyckats göra just ett sådant experiment. De skapar par av fotoner som är sammanflätade och skickar en foton från varje par från La Palma till Teneriffa. Sedan mäter de polarisationen hos de båda fotonerna och undersöker korrelationer mellan dem. Det låter enkelt, men tänk dig själv att skicka enstaka fotoner genom luften och detektera samma fotoner 144 km bort! Bakgrundsljus från andra källor men också stark vind och temperaturförändringar bidrog till en hög brusnivå. Varför inte bara göra experimentet i ett vanligt labb?

Det man vill visa i experiment av den här typen är att en mätning som görs på en plats (till exempel La Palma) påverkas av en mätning som görs på en annan plats (till exempel Teneriffa) utan att några signaler går mellan mätutrustningarna. Inga signaler kan färdas snabbare än ljusets hastighet, så om mätningarna utförs synkroniserat, så att inga signaler hinner gå från den ena mätstationen till den andra medan mätningen sker, är man säker på att ingen kommunikation äger rum.

Men det räcker inte för att motbevisa teorier som bygger på lokal realism. Det finns en liten risk att fotonerna redan då de skapas innehåller information om vilken mätning som kommer att ske och därför i förhand "bestämmer sig för" vilket resultat de ska ge. För att utesluta att så är fallet vill forskarna bestämma vilken mätning som ska göras först efter det att fotonerna har skapats, då de redan är på väg i full fart mot mätutrustningen. Då kan fotonerna inte ha skapats med inbyggd information om vad som ska mätas. Det innebär att minst en av mätstationerna måste vara tillräckligt långt bort från ljuskällan så att man hinner bestämma vilken mätning som ska göras efter det att fotonerna skapats, men innan

någon signal hinner gå från ljuskällan till mätutrustningen.

Fotonerna skapas i det här fallet på La Palma, och de tar dem ungefär en halv millisekund att nå mätstationen på Teneriffa. En halv millisekund är en kort tid, men tillräckligt lång för att en modern dator ska hinna bestämma vilken mätning som ska göras med hjälp av en slumpvalsgenerator.



*Två fotoner med sammanflätad polarisation skapas på La Palma. Den ena skickas från ett teleskop 144 km genom luften mot Teneriffa där den fångas upp av ett andra teleskop. Den andra stannar på La Palma och skickas in i en 6 km lång optisk fiber. Medan fotonerna är på väg mot mätutrustningen, i fibern respektive i luften, låter man en slumpvalsgenerator på varje ö bestämma i vilken riktning polarisationen ska mätas.*

Så vad visar mätningen? Den visar att lokal realism inte håller. Faktum är att mätresultatet skiljer sig från vad som är möjligt om vi antar lokal realism med hela 16 standardavvikelser. Det måste antingen vara så att fotonernas polarisation inte har någon bestämd riktning innan vi mäter, eller att fotonerna på något sätt kan påverka varandra, trots att de är på olika platser och ingen signal kan gå mellan dem, eller kanske både och. Resultaten publicerades 2010 med den spännande titeln "Violation of local realism with freedom of choice" [3].

Det finns dock fortfarande kryphål kvar, osannolika processer som skulle kunna rädda min intuitiva bild av verkligheten. Till exempel har alla detektorer

begränsad effektivitet, vilket innebär att alla fotoner inte detekteras. Antag att de fotoner vi detekterar inte är slumpmässigt utvalda av alla de som skapas, utan någon konstig process gör att vi bara detekterar de fotoner som stämmer med kvantmekanikens förutsägelser, medan de som inte stämmer passerar obemärkta. Då kan mätningen inte ge en sann bild av verkligheten. De flesta forskare skulle dock hålla

med om att sannolikheten att någonting sådant händer är mycket liten.

Om vi litar på experimentet betyder det att vi måste ge upp tanken på antingen lokalitet eller realism. Antingen kan föremål på olika platser i universum påverka varandra även då inga signaler färdas mellan dem, eller så kan det vi ser och upplever i världen runt oss inte sägas existera oberoende av vår upplevelse. Men är det lokalitet eller realism som inte stämmer, eller både och?

Nu pågår arbetet med att utveckla nya typer av Bell-experiment, som kan testa lokalitet och realism var för sig. Än så länge pekar experimenten mot den förvånande slutsatsen att realism inte är kompatibelt med mätresultaten [4]. Det skulle betyda att föremåls egenskaper kan vara obestämda innan vi observerar dem och bli ”verkliga” först i det ögonblick vi upplever dem.

Abraham Pais, Einsteins vän och kollega på Princeton, beskriver hur Einstein under en promenad plötsligt stannar upp och frågar [5]:

– *Tror du verkligen att månen bara existerar då du tittar på den?*

Anton Zeilingers motfråga, ställd ungefär 60 år senare, är [6]:

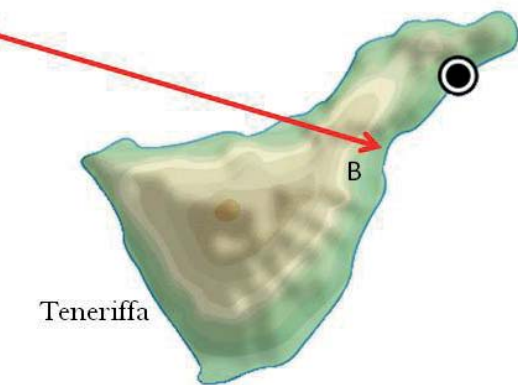
– *Varför är du inte nöjd med att beskriva verkligheten av observationer? Varför vill du ha en dold verklighet som existerar oberoende av observation?*

Kanske håller vi sakta på att lära oss att världen inte är så som vi intuitivt tror.

JENNY KARLSSON  
LUNDS UNIVERSITET

Läs mer:

- [1] Einstein, Podolsky and Rosen, Phys Rev 47, 777 (1935)
- [2] Bell, Physics 1, 195 (1964)
- [3] Scheidl et. al., PNAS 107 (46) 19708-19713 (2010)
- [4] Gröblacher et al, Nature 446, 871 (2007)
- [5] Pais, Rev. Mod. Phys. 51 (4) (1979)
- [6] Interview in Discover, July-August 2011



*Ett teleskop som tillhör European Space Agency, ESA, användes som mottagarstation på Teneriffa.*

# Extremt korta laserpulser

**A**tt världen runt omkring oss ser ut som den gör beror på hur ljus växelverkar med elektroner. Hur den växelverkan går till beskrivs väldigt bra av kvantmekaniken, men det har fram tills nu inte varit möjligt att mäta alla detaljer i vad som händer, det går helt enkelt för fort. Genom att skapa extremt korta laserpulser är det nu möjligt att tjuvkika lite på elektronernas dans i atomer och molekyler. Därmed kan vi testa om de

kvantmekaniska teorierna stämmer, men också visa att förlopp som vi tidigare trodde skedde momentant faktiskt tar lite tid.

Det är spännande att tänja gränser och testa vad som är möjligt. Det är givetvis en av lockelserna med att skapa så korta laserpulser som möjligt. En annan anledning är att vår förståelse för världen runt omkring oss ökar varje gång vi får tillgång till kortare tidsskalor. På sidan 9 presenterar Villy Sundström hur femto-

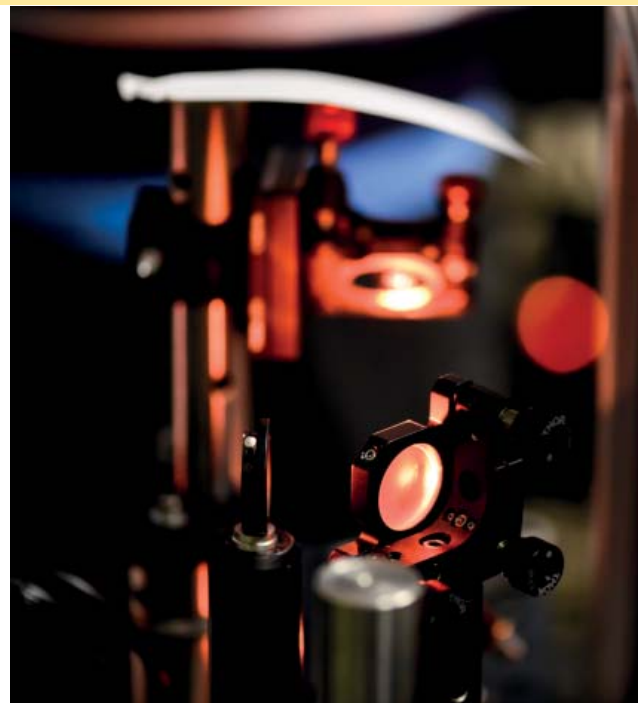
sekundpulser kan användas till att studera hur molekyler rör sig för att bättre förstå fotosyntesen. I sin avhandling, som presenteras på sidan 18, visar Christoph Heyl hur ännu kortare pulser, attosekundpulser, kan skalas upp och genereras vid olika repetitionsfrekvenser. Olika pulslängder presenteras i faktarutan. Men hur korta pulser kan vi skapa? Vad är det som sätter begränsningarna och vad kan vi göra för att överkomma dessa?

## Kort, kortare, attosekund

I den här artikeln presenterar vi grunderna för korta laserpulser, hur långt vi har kommit och hur vi gör för att skapa de kortaste pulserna idag.

Vad är det då som sätter gränsen för hur korta ljuspulser det går att skapa? Det finns framförallt två fundamentala begränsningar för hur kort en puls kan bli. För det första gäller att ju kortare puls vi vill skapa desto fler frekvenskomponenter måste den innehålla. Det betyder att pulsens spektrala bandbredd måste öka och vi får följande samband mellan pulslängd och bandbredd

$$\tau \Delta\nu \geq 1,$$



*Bild 1. Fotografi av en laseruppställning där en 3 femtosekunder lång puls reflekteras av två speglar.*

der  $\tau$  är pulslängden och  $\Delta\nu$  bandbredden. Det här sambandet har stora likheter med Heisenbergs osäkerhetsrelation, men var välbekant långt innan kvantmekanikens födelse. Att bandbredden ökar ju kortare pulser vi skapar leder också till att vi behöver använda kortare våglängder, dvs högre frekvenser, eftersom bandbredden till slut bara kan öka mot högre frekvenser då noll är en naturlig lägre gräns. Det här är kopplat till den andra begränsningen: En ljuspuls kan inte bli kortare än vad den centrala våglängden

av ljuset som skapar den motsvarar i tid. I det synliga området kan pulserna därför inte bli kortare än några femtosekunder (500 nm motsvarar 1,67 fs). En så kort ljuspuls kommer då att ha så bred bandbredd att den innehåller nästan samtliga synliga frekvenser och upplevs som vitt ljus.

Fotot i bild 1 visar en 3 fs lång ljuspuls som reflekteras i en spegel, att den ser gulaktig ut beror på att den inte är centrerad i mitten av det synliga området utan skiftad mot längre våglängder.

För att skapa ljuspulser som är kortare än en femtosekund måste vi alltså utnyttja ljus med våglängder som är kortare än de i det synliga området, dvs ultraviolett eller till och med extremt ultraviolett ljus (XUV). Tillvägagångssättet som visat sig vara mest framgångsrikt brukar benämnas ”generering av höga övertoner”.



## Trestegsmodellen:

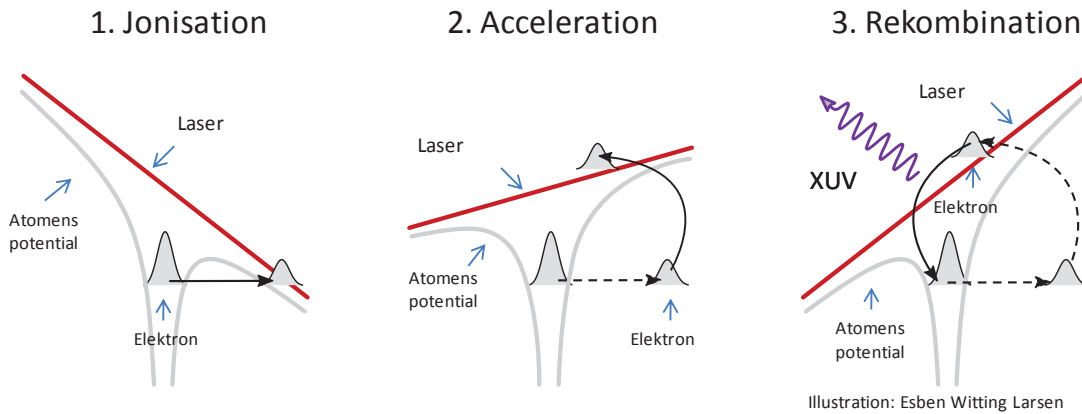


Bild 2. Trestegsmodellen. Den atomära potentialen deformeras av det starka laserfältet och elektronen 1) joniseras genom tunneljonisation, 2) den accelereras i laserfältet och tillslut 3) den drivs tillbaka till jonen där en kort ljusblixt skapas då elektronen och jonen rekombinerar.

Illustration: Esben Witting Larsen

I den här processen används en laser med väldigt hög intensitet till att skapa XUV ljus genom att den fokuseras i en gas med hög densitet. Vad som händer i gascellen kan vid första anblicken verka märkligt – synliga ljuspulser som är flera femtosekunder långa omvandlas till ljus med mycket, mycket kortare våglängder och pulserna kan nu vara så korta som några tiotals attosekunder. Som tur är går det att förstå huvuddragen i processen med hjälp av en förenklad, semi-klassisk modell. Att modellen kallas semi-klassisk syftar till att den så långt det går behandlar elektronen som en klassisk partikel.

Modellen brukar kallas ”**trestegsmodellen**” (se bild 2) eftersom den delar upp övertonsgenereringen i just tre steg. Det första steget går ut på att jonisera en atom. Det starka laserfältet deformerar den atomära potentialen så att det skapas en barriär genom vilken en elektron kan tunnla ut. Väl frigjord kan elektronen accelereras av laserfältet, steg 2, till en början med bort från atomen, men när laserfältet byter tecken drivs den tillbaka mot jonen där flera olika saker kan hända. Bland annat kan elektronen återgå till grundtillståndet och all den energi

som den har ackumulerat när den accelererades av laserfältet sänds ut som en kort, högenergetiskt ljusblixt, steg 3.

Höga övertoner observerades första gången redan 1987 och röntne stor uppmärksamhet som en metod att skapa koherent XUV ljus. Trestegsmodellen presenterades efter några år (1993) och formaliserades kvantmekaniskt året därpå. Ungefär samtidigt blev det uppenbart att processen måste gå att använda för att skapa attosekundspulser, men det dröjde ändå in på 2000-talet innan någon lyckades mäta attosekundspulser på grund av den tekniska utmaningen det innebär att mäta så korta pulser med så kort våglängd.

Hur mäter man då den kortaste ljuspuls som finns? I vanliga fall när man ska mäta korta ljuspulser används en annan, gärna kortare, ljuspuls och man utnyttjar någon process som bara inträffar när de två pulserna överlappar. Om det inte finns en kortare puls så kan man dela sin puls i två delar och på liknande sätt använda den till att mäta sig själv. Tyvärr är den här tekniken väldigt utmanande för attosekundspulser på grund av den korta våglängden. Istället har en ny teknik utvecklats. Man använder en mycket längre puls, med längre våglängd, men istället för att använda pulsformen vid mätningen används det elektriska fältet och hur det ändrar sig vil-

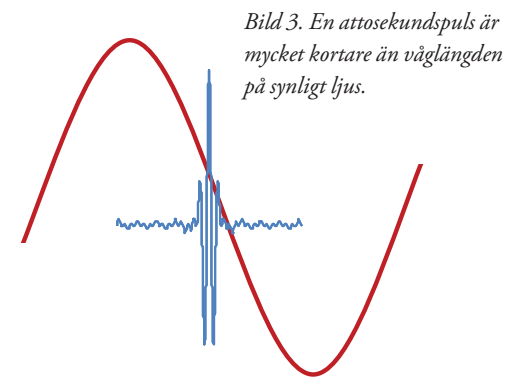


Bild 3. En attosekundspuls är mycket kortare än våglängden på synligt ljus.

ket ger möjlighet att mäta pulser som är kortare än 100 attosekunder (se bild 3).

Efter mer än ett decennium med attosekundspulser har både genereringsprocessen och mätteknikerna förfinats och flera olika tillämpningar börjar se dagens ljus. Till exempel går det att mäta hur lång tid Augerprocessen tar eller hur lång tid det tar för en elektron att passera igenom några få atomlager. En fundamental process som tidigare oftast beskrevs som momentan, men som faktiskt tar lite tid är den fotoelektriska effekten, jonisation med en foton. Genom att samtidigt jonisera elektroner från olika sub-skal går det att mäta att det faktiskt tar olika lång tid för dem att frigöra sig från atomen och möjligen lite överraskande visar det sig att det ibland är så att ju hårdare elektronen är bunden till atomen desto fortare lossnar den.

JOHAN MAURITSSON  
PER JOHNSON  
ANNE L’HULLIER,  
LUNDS UNIVERSITET

### Faktaruta

1 sekund	1 s	1 s	1 s
1 millisekund	1 ms	$10^{-3}$ s	0,001 s
1 mikrosekund	1 $\mu$ s	$10^{-6}$ s	0,000 001 s
1 nanosekund	1 ns	$10^{-9}$ s	0,000 000 001 s
1 pikosekund	1 ps	$10^{-12}$ s	0,000 000 000 001 s
1 femtosekund	1 fs	$10^{-15}$ s	0,000 000 000 000 001 s
1 attosekund	1 as	$10^{-18}$ s	0,000 000 000 000 000 001 s

# Skalningsmodell för övertonggenerering

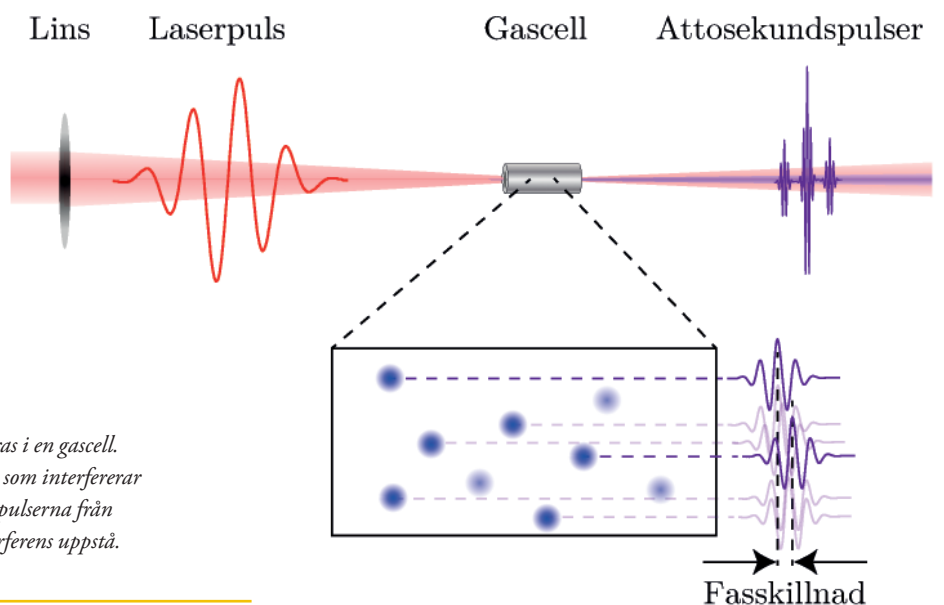
I världen runt omkring oss används lasrar till många olika ändamål, från CD-spelare och i telekommunikation till olika spektroskopi- och mikroskopi-tillämpningar inom fysik, biologi, kemi och medicin. Den grundläggande processen, själva laserprocessen som möjliggör genereringen av laserljus är dock begränsad till det synliga eller i närheten av det synliga området. Att skapa ljus i det extremt ultravioletta området med egenskaper som liknar laserljusets egenskaper är trots detta mycket intressant och viktiga tillämpningar som utnyttjar laserljusets egenskaper i tid, rum och frekvens finns inom många olika områden.

Korta ljuspulser, bara några femtosekunder långa, i det synliga (eller i närheten av det synliga) området kan relativt enkelt skapas med dagens lasersystem. För att nå ännu kortare tidsskalor använder vi oss av en process som kallas för generering av höga övertoner och som bygger på omvandling av en liten del av laserpulsernas energi till ännu kortare pulser, men nu i det extremt ultravioletta våglängdsområdet. Processen som omvandlar ljuset är tyvärr mycket ineffektiv. Denna avhandling visar hur övertonggenereringen kan skalas upp till mycket högre pulsenergi, men också till högre repetitionshastigheter för att uppfylla kraven som dagens fysikexperiment har.

Med olika omvandlingsprocesser ("wave mixing" och "harmonic generation" på engelska) är det möjligt att omvandla laserljus till andra spektrala områden där lasring är starkt begränsad, eller till och med omöjlig. 1987 upptäcktes höga övertoner, skapade genom en pro-

cess som tillåter omvandling av laserpulser till så kallade attosekundspulser med våglängder som når ända till röntgenområdet. Extremt ultravioletta ljuspulser genererade på detta sätt kan ha liknande egenskaper i tid, frekvens och spatiellt som laserpulsen som används för att generera dessa pulser. Nackdelen är att de tyvärr har väldigt lite energi per puls. De första höga övertoner som producerades innehöll bara en väldigt liten del av den ursprungliga laserpulsernas energi. Mo-

dernare attosekundspulskällor, baserad på högeffektslasersystem, når miljontals gånger högre värden men trots detta fortfarande bara en hundratusendedel av den ursprungliga laserpulsernas energi. I denna avhandling presenteras en allmän skalningsmodell för övertonggenereringsprocessen. Modellen förklarar hur attosekundspulsernas energi kan skalas över flera storleksordningar utan att påverka pulsernas egenskaper. Det visas att effektiv attosekundspulsgenerering är



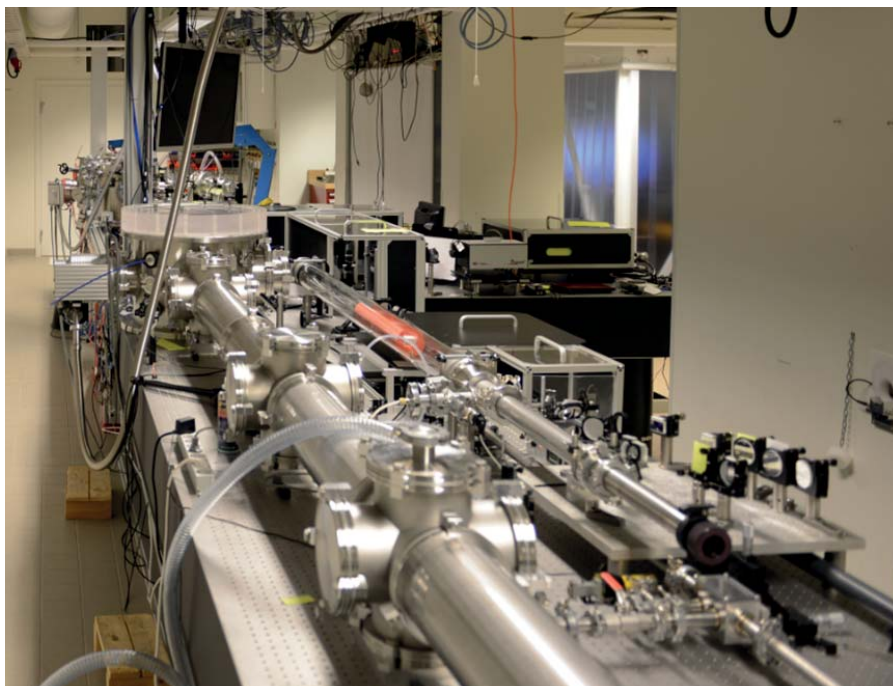
*Generering av höga övertoner: en laserpuls fokuseras i en gascell. Atomer i gascellen kan emittera attosekundspulser som interfererar med varandra. Beroende på fasskillnaden mellan pulserna från olika atomer kan destruktiv eller konstruktiv interferens uppstå.*

möjlig även med svaga laserpulser vilket möjliggör generering av många pulser per sekund; en viktig förutsättning för många spektroskopiapplikationer.

Processen för övertongenerering är illustrerad i figur 1. En kort laserpuls fokuseras i en gascell. Genom att koncentrera pulsens energi i tid (kort pulslängd) och spatiellt (genom att fokusera den) är det möjligt att uppnå mycket höga intensiteter ( $\text{intensitet} = \text{pulsenergi} / (\text{tid} \cdot \text{yta})$ ). Varje gasatom i detta starka ljusfält kan sända ut högenergetiska ljusblixtar. Själva genereringsprocessen kan beskrivas med den så kallade "trestegsmodellen" (läs om trestegsmodellen på sid 17). För att säkerställa att hela processen är så effektiv som möjligt gäller två villkor:

- 1) Alla ljusblixtar måste sändas ut "i fas"
- 2) Så många atomer som möjligt skall användas med hänsyn till att (1) uppfylls

Varje ljusblixt kan beskrivas som ett mycket kort, oscillerande elektromagnetiskt fält. Två vågor är "i fas" om deras fält oscillerar likadant. Olika faktorer som t.ex. fokusering av laserpulsen och dispersion i gasen bestämmer fasförhållandet mellan alla dessa ljusblixtar. Antalet atomer som kan bidra bestäms av gasdensiteten och av den volym definieras av laserns fokus. Ju högre densitet, desto fler atomer kan bidra till processen. Om man ökar densiteten för mycket, förstörs tyvärr fasförhållandet och omvandlingsprocessen blir ineffektiv. Volymen bestäms av laserpulsen energi och intensiteten som krävs för genereringsprocessen. Genom att fokusera en laserpuls tätare skapas högre intensitet men samtidigt minskas genereringsvolymen och fasförhållandet mellan ljusblixtar som genereras på olika ställen inom gascellen ändras sig. Att nå intensitetskraven för hög övertongenerering är enklast med högeffektslasersystem som genererar laserpulser som innehåller några tiotals millijoule energi och som bara måste fokuseras svagt. För många tillämpningar är det dock mycket bättre att använda lasersystem som genererar mycket svagare pulser. Anledningen är att ju mindre laserpulsen energi är, desto fler pulser kan genereras per sekund.



Figur 2: Den högentensiva attosekundsstrållningen som byggdes den senaste åren i högeffektslaser-faciliteten vid Lunds Laser Centrum.

Att generera flera tusen eller miljon pulser per sekund är mycket viktigt för moderna spektroskopitillämpningar då signal-brus-förhållandet ökar med antalet pulser. Sådana svaga laserpulser måste fokuseras mycket hårt för att nå nödvändig intensitet.

Hela övertongenereringsprocessen påverkas av ett flertal olika experimentella parameter. Experimentellt krävs oftast en iterativ procedur för att hitta de optimala värdena för intensitet, gasdensitet, fokusering mm. En sådan optimeringsprocess är tekniskt mycket komplicerad. Skalningsmodellen som beskrevs i detalj i den här avhandlingen gör det möjligt att räkna ut de bästa värdena för attosekundskällor med hög pulsenergi eller hög repetitions-hastighet. På det sättet är det möjligt att designa nya attosekundskällor som är optimerade för olika tillämpningar. I avhandlingen gjordes just detta. En ny attosekundskälla designades och skall snart byggas i den europeiska forskningsanläggningen ELI-ALPS i Ungern. Attosekundskällan är baserad på systemet som har byggts upp de senaste åren vid högeffektslaserfaciliteten vid Lunds Laser Centrum och utlovar att sätta ett nytt rekord för attosekundspulsernas energi och effekt. En sådan attosekundskälla öppnar nya möjligheter för tidsupplöst spektro-

#### Christoph Heyl

- Doktorsavhandling i fysik, Avdelningen för atomfysik, tekniska fakulteten vid Lunds universitet
- Titel : Scaling and gating attosecond pulse generation
- Länk till avhandlingen: <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOid=4779571&fileOid=4937902>
- Framlagd: 12 december 2014
- Handledare: Anne L'Huillier (Lund) Ulrich Höfer (Marburg, Tyskland)

skopi och mikroskopi. Attosekundspulser som innehåller tillräckligt mycket energi utgör ett perfekt verktyg för att mäta elektronernas rörelse till exempel i molekyler. Att använda extremt ultraviolett ljus med tillräckligt hög effekt istället för synligt ljus för optisk mikroskopi utlovar att förbättra den spatiella upplösningen betydligt vilket innebär nya möjligheter inom biologi och medicin.

CHRISTOPH HEYL  
LUNDS UNIVERSITET

# Familjen ger extra energi och glädje



Foto: Charlotte Heyl, 2014

Christoph Heyl, från Kassel i Tyskland, gillar vetenskapliga utmaningar. Men den största utmaningen just nu är att få livspusslet att gå ihop – att hitta den perfekta balansen mellan livet som småbarns-förälder, forskningen och fritiden

## *Hur kommer det sig att du hamnade i Sverige?*

– Ett cykeläventyr i Skandinavien sommaren 2004, efter gymnasiet, är en avgörande faktor, berättar Christoph. Jag och en kompis cyklade 3000 km bland annat från Stockholm till Kiruna. De stora skogarna och oändliga vidderna i norra Sverige var fantastiska att uppleva på cykel. Naturen i Sverige är så annorlunda och när han under läsåret 2007/2008 fick möjligheten att bli Eras-

mus-stipendiat var det Sverige, de vänliga människorna, och Lunds universitet som lockade. Redan under tiden som utbytesstudent fick han kontakt med forskningsgruppen, där han sedan blev doktorand i juni 2010.

Christoph gillar att cykla och genomförde även Vätterrundan under 2013.

– Cykling ger en frihetskänsla som är svår att beskriva, reflekterar han.

## *Vad är hemligheten med att du kan tala så bra svenska?*

Christoph får ett extra brett leende på läpparna över frågan och avslöjar hemligheten. – Jag och en kollega delade rum under min doktorandtid och vi ville båda förbättra våra kunskaper i svenska respektive tyska, berättar han. Vi gjorde en överenskommelse som fungerade och gav oss båda bättre språkkunskaper. Jag blev bättre i svenska och min kollega i tyska. Måndag, onsdag, fredag pratades bara svenska i vårt delade arbetsrum och tisdag, torsdag bara tyska.

Det hände mycket under Erasmus-året i Sverige. Många utbytesstudenter umgicks med varandra och Christoph träffade sin blivande fru som också var Erasmusstipendiat från Tyskland, men vid medicinska fakulteten. Nu arbetar hon som ST-läkare och deras lilla dotter, går på dagis.

Christoph är imponerad över de möjligheter man får tillgång till i Sverige med föräldraledighet och dagis. Christoph kände sig privilegierad när han kunde vara föräldraledig under fem månader. Det känns viktigt att skapa trygghet för familjen.

Christoph prioriterar sin familj, den ger energi, samtidigt som den tar kraft. Det är flera att ta hänsyn till. Lilla Linnéa, snart två år, behöver både pappa och mamma.

## *Varför blev det fysik?*

Christoph är näst äldst av de fyra systerbarnen, men den ende som valt naturvetenskap. Han gick i en Waldorfskola där kreativitet och konstnärliga talanger sti-

mulerades, så det blev naturligt med ett yrkesval där stor kreativitet var en fördel. Men det var inte självklart med fysik från början. – I backspeglarna inser jag att ett annat val än fysik hade jag ångrat, säger han.

### Vad är det i forskarrollen som lockar mest?

– Den nyfikenhetsbaserade grundforskningen, som kräver fantasi och kreativitet och en förmåga att tänka fritt känns speciellt lockande berättar Christoph och han hoppas på en framtida forskarkarriär i Sverige eller Tyskland. Forskningen passar honom och hans sätt att aktivt ta sig an frågor och söka svar.

### Vilka egenskaper känner du är viktiga för dig som forskare?

– Förutom kreativitet är nog förmågan att inte ge upp otroligt värdefull, svarar han. Man behöver vara lite envis. Om det inte fungerar på ena sättet så får man ta nya tag och tänka om.

– Det är viktigt med en drivkraft att förbättra och inte ge upp. Oftast kan det löna sig att tänka igenom vanliga metoder och även ifrågasätta dem. Det kan leda till nya resultat, som i min avhandling, säger Christoph.

Musiken betyder mycket för Christoph. Föräldrarna och alla fyra syskonen spelade olika instrument. Musiken lärde Christoph att vara uthållig, att inte tröttna, tror han.

### Vad spelade du för instrument?

– Jag spelade altfiol, berättar han. Mina föräldrar såg till att jag spelade regelbundet varje dag. Tyvärr finns det inte tid för altfiolen idag. Det blir andra prioriteringar istället. Han avslöjar dock att han sjunger tenor i en studentkör och att även hans fru sjunger i kör.

Långsamt under vårt samtal växer det fram en bild av en naturälskande aktiv familj som delar många intressen. Fjällvandring i Sarek och cykling längs skånekusten och Österlen är något Christoph lockas av. Just nu är det dock de framtida forskningsutmaningar som lockar mest.

Christoph gillar att arbeta i en forskargrupp. Det är stimulerande och något som han prioriterar, samtidigt som han definitivt vill tänka själv och fatta egna beslut.

Christoph fortsätter att prata om nya utmaningar inom fysiken och ser fram emot sin postdoc-vistelse i USA. Om vi fysiker får tillgång till nya verktyg kanske etablerade kunskaper får en ny förklaring. Allting är otroligt spännande just nu och jag ser verkligen fram mot tiden vid JILA i Boulder, berättar han. Forskningen som bedrivs är på toppnivå, och de är välrenommerade. Gruppen använder samma teknik som jag gjort i min avhandling, men har forskningsfokus inom ett närliggande område.

### Vad kommer du att forska på under din postdoc?

– Temat för mitt forskningsarbete blir extrema ultravioletta frekvenskammor som används för högupplöst spektroskopi, berättar Christoph och fortsätter.

Optiska frekvenskammor är väl kända sedan Nobelpriset i fysik 2005, och de skapas i eller nära det synliga området. Tekniken som jag använde under mitt avhandlingsarbete, att skapa ultrakorta ljuspulser tillåter även att skapa frekvenskammor i det extrema ultravioletta området. Det öppnar sig då nya möjligheter, till exempel att bygga klockor som är bättre än nuvarande atomur.

### Har du några planer efter postdoc?

– Jag vill gärna återkomma till Sverige eller Tyskland och arbeta som forskare, berättar Christoph för FA. Det finns många närliggande områden som också kan vara intressanta. Min postdoc-forskning kommer att bli en bra komplettering till min avhandling.

MARGARETA KESSELBERG  
FYSIKAKTUELLT



Foto: Charlotte Heyl, 2014

- Namn: Christoph Heyl, 31 år
- Familj: gift och en dotter, (född 2013)
- Bor: Lund
- Utbildningsbakgrund: Abitur, (tysk studentexamen) Waldorfgymnasiet i Kassel (2003)
- Akademisk examen i fysik vid Marburg Universität (2010)
- Doktorsexamen vid Lunds Tekniska Högskola (LTH) (dec 2014)
- Kommande arbete: Postdoc i fysik, (Högupplöst spektroskopi) vid JILA i Boulder, USA
- Framtidsplaner i ett längre perspektiv: Forskare i Sverige eller Tyskland
- Fritidsintressen: Familj, cykling, körsång och naturupplevelser

# Solceller

Den moderna samhällsutvecklingen innebär att vi blir allt mer beroende av elektricitet. Inte bara för belysning, matlagning och kylning hemma, utan även för sådant som att betala i affären, använda mobiltjänster eller hämta information. Ett troligt framtidsscenario är att vi globalt kommer att ha en mycket högre elkonsumention om några år än vi har idag, främst för att världsbefolkningen förväntas öka kraftigt.

Var skall all den elen komma ifrån? Den enda källan som har tillräcklig stor kapacitet för att täcka det globala energibehovet är solen. Solenergi kan omvandlas på många olika sätt till användbara energiformer, men endast ett av alla dessa sätt omvandlar ljuset till el i ett enda steg, nämligen solceller. Solel är ren, utsläppsfri och innebär relativt låga investeringskostnader, vilket gör den tillgänglig var som helst på Jorden.

## Solcellsfysik

Solcellen är en ljuskänslig släkting till dioden som vi använder som likriktare

för ström. Solcellen är också släkt med lysdioden som, till skillnad från solcellen, omvandlar elektrisk energi till ljus (se Fysikaktuellt nr 4/2014 om Nobelpriset i fysik). Precis som dioden och lysdioden är solcellen en halvledarbaserad komponent. Som batterier genererar solcellen likström.

Den vanligaste halvledaren som används för solceller är kisel. De flesta kommersiella solceller och moduler idag är gjorda av enkristallint eller polykristallint kisel. Lite otippat, eftersom kislets bandgap är endast 1,12 elektronvolt, vilket motsvarar fotonenergi i det infraröda området (1100 nm), medan solens spektrum har högst spektral irradians (effekt-täthet per våglängsenhet) mellan 400 och 500 nm. Bandgapet för en halvledare är minimienergin som behövs för att slå loss en elektron från dess bundna tillstånd. Kisel kan alltså absorbera ljus med kortare våglängder än 1100 nm, dvs hela det synliga spektret. Däremot bidrar inte högenergetiska fotoner mer än lågenergetiska eftersom varje foton frigör bara en elektron. Detta gör att en del av ljusets energi (den delen av fotonens energi som är högre än bandgapet) inte används till elproduktion utan omvandlas däremot till värme. Detta, tillsammans med att fotoner med energier lägre än bandgapet inte absorberas, är orsaken för att den finns en begränsning för solcellers näbara verkningsgrad, den så kallade Shockley-Queisser-limten. För att kiselmaterialiet skall fungera som en solcell behöver lokalt

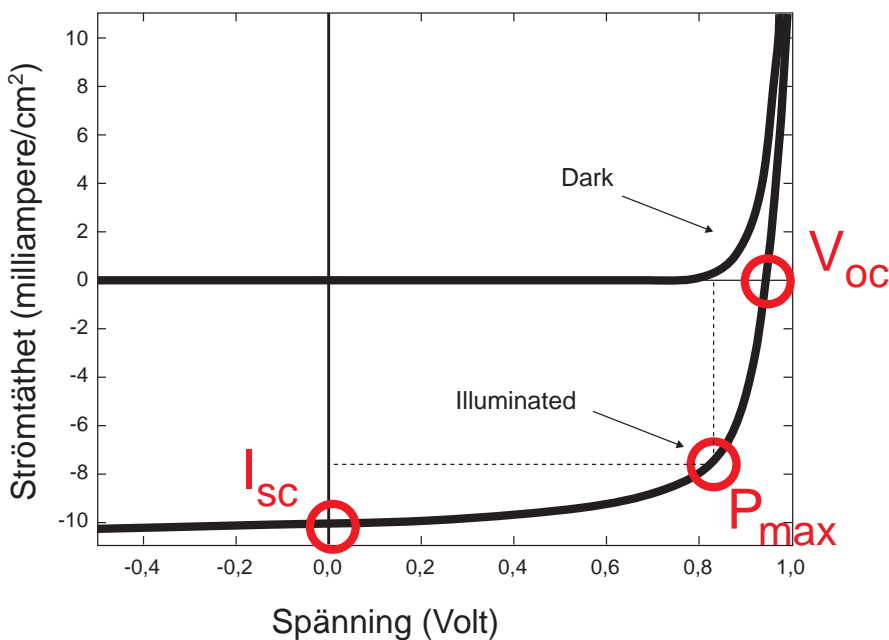
andra ämnen (dopningsämnen) tillsättas med fler, alternativt färre valenselektroner än kisel som har fyra. Dessa dopade kiselvarianter kallas för typ n om de har berikats med atomer med fem valenselektroner, eller typ p om atomer med tre valenselektroner har tillsatts. Typ n kisel har extra elektroner som är rörliga medan typ p kisel saknar elektroner, vilket ger upphov till extra så kallade hål som rörliga laddningsbärare. Båda dessa kiseltyper behövs i en solcell för att den skall kunna fungera, eftersom det är vid gränsskiktet mellan p och n som solcellens viktigaste processer sker. Vid den så kallade p-n-övergången bildas ett elektriskt fält som separerar de frigjorda laddningsbärarna (ledningselektronerna och -hål) och ger dem en riktning för att färdas mot en av kontaktorna (elektrodena) och bidra till den fotogenererade strömmen i en extern krets.

Utöver kiselceller finns även ett antal nyare teknologier baserade på andra material. Bland de alternativa solcellsmaterialen finns oorganiska halvledare, organiska molekyllära material, och även kombinationer av båda. En skillnad mellan dessa alternativa solceller och kiselcellen är att materialet som fungerar som typ n och det som är typ p är gjorda av olika halvledare. Även i organiska solceller används en molekyl som elektrongivare och en annan molekyl som elektronmottagare.

Solcellens verkningsgrad bestäms genom att mäta en ström-spänningskurva under standardbelysning (1000 W/m<sup>2</sup> ljus med ett spektrum som liknar solljus). Detta görs enklast genom att koppla solcellen till ett variabelt motstånd. Från ström-spänningskurvan kan sedan tre viktiga parametrar extraheras; spänningen vid öppen krets ( $V_{OC}$ ) också kallad för tomgångsspänning, kortslutningsströmmen ( $I_{SC}$ ) och fyllnadsfaktorn (FF), och verkningsgraden beräknas enligt:

$$\eta = \frac{\text{effekt ut}}{\text{effekt in}} = \frac{P_{max}}{P_{ljus}} = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{ljus}}$$

Fyllnadsfaktorn är förhållandet mellan maxeffekten  $P_{MAX}$  och produkten av  $I_{SC}$  och  $V_{OC}$ . Den visualiseras enklast grafiskt i ström-spänningsdiagrammet



Figur 1: Solcellens ström-spänningskurva där tomgångsspänningen ( $V_{OC}$ ), kortslutningsströmmen ( $I_{SC}$ ) och maxeffekten  $P_{MAX}$  är markerade.

genom förhållandet mellan arean för två rektanglar, den ena som har ett hörn i  $P_{MAX}$  och den andra som har sidorna  $I_{SC}$  och  $V_{OC}$ . Solcellens tomgångsspänning bestäms till stor del av halvledarens bandgap. Kiselsolcellers tomgångsspänning varierar från 0,6 V för kommersiella polykristallina celler till 0,73 V för enkristallina solceller med hög kvalitet. Högre värden kan uppnås genom att använda halvledare med bredare bandgap. För att nå mycket högre spänningar behöver solceller seriekopplas.

Svensk solcells forskning är till stor del fokuserad på nya typer av solceller och nya material. Svenska forskargrupper har en framstående roll i den internationella solcells forskningen och har bidragit till flera av de senaste framgångarna. Ett exempel är tunnfilmssolcellen av koppar indium galliumselenid som har uppnått verkningsgrader över 20 %. Ett annat exempel är nanotrådssolceller av så kallade III-V-halvledare, som gallium arsenid, som har visat sig kunna överstiga Shockley-Queisserlimiten. Även polymersolcellen som tillverkas från lösning genom en bestrykningsteknik (se Fysikaktuell

nr 2/2011), har nått 10 % verkningsgrad och tryckta polymersolceller är under utveckling. Den senaste nykomlingen i skaran är perovskitsolcellen som är en organisk-oorganisk hybrid och har visat sig uppnå mycket lovande verkningsgrader som närmar sig 20 % i en oerhört snabb takt.

För att möta framtidens energibehov och att aktivt verka för ett bibehållet klimat, måste utvinningen av solen ökas. Solinstrålningen i Sverige räcker mer än väl till för att täcka våra behov, om vi bara hittar smarta lösningar för att lagra elen och reglera vår totala elproduktion så att variationerna i solkraftsgenerering inte blir ett hinder. Tillgången till vattenkraft är här en enorm fördel. Det är viktigt att bättre lagringsmöjligheter för el utvecklas, till exempel i form av kraftfulla batterier. Därför borde energilagring vara ett högt prioriterat forskningsområde.

Referens för solcells fysik: <http://pveducation.org>

ELLEN MOON  
KARLSTADS UNIVERSITET

## Solenergitrender i Sverige

Har ett nordiskt land som Sverige tillräckligt med solljus för att satsa på solenergi?

Solinstrålningen i Sverige är lägre än i många andra länder på grund av sin nordliga latitud som gör att vinkeln för solinstrålningen som störst är 58 grader. Detta kan delvis kompenseras genom att installera solpaneler under anpassad vinkel eller på en "tracker" som följer solen. Sverige och andra nordliga länder har å andra sidan stora ytor som är tillgängliga för installation av solkraft. Om den genererade elen kan lagras effektivt kan en nordisk satsning definitivt löna sig.

Vad har man för nytta av solpaneler på vinter när landet är täckt med snö?

Vid nordliga latituder är variationerna i instrålning mellan säsongerna stora. Den totala instrålningen av solljus täcker in både den direkta instrålningen och den diffusa strålningen från himlen och marken. På vintern, när Sverige behöver mest el, kommer inte solen upp särskilt högt, så att den direkta instrålningen är låg. Men så snart snön kommer, och när den har glidit ner från modulerna, då stiger den totala instrålningen påtagligt igen på grund av att snön reflekterar ljuset. Även låga temperaturer är fördelaktiga eftersom kiselsolcellers verkningsgrad ökar med minskande temperatur.

Hur mycket sol produceras i Sverige?

I Sverige installeras allt fler solpaneler. I dagsläget har infrastrukturen en sammanlagd kapacitet på 39 GWh per år, vilket dock endast motsvarar 0,03 % av Sveriges totala elkonsument. Majoriteten av installationerna är gjorda med moduler importerade från Kina och Tyskland. Sverige producerar också solmoduler, numera endast på ett enda ställe, nämligen på Swemodule i Glava i västra Värmland, där också en av Sveriges största solkraftparker finns. Majoriteten av deras produktion exporteras, vilket gör att Sverige i dagsläget faktiskt är en nettoexportör av solmoduler.

Vad kostar solpaneler?

Moduler blir allt billigare, internationellt såväl som i Sverige. Typiska modulpriser har minskat från ungefär 70 kronor/watt till 10 kronor/watt över de senaste tio åren. En 200 watt solmodul kostar alltså ungefär 2000 kronor. Ett typiskt system förväntas ha en livslängd på 25 år.

Referens: National Survey Report of PV Power Applications in Sweden 2013, Johan Lindahl, Uppsala University.

# Trädgårdsmästarsonen som får forskartalanger att växa och blomma

Sune Svanberg, senior-professor i atomfysik vid Lunds universitet har fortfarande drivkraften att skapa och utveckla ny kunskap inom tillämpad laserspektroskopi.

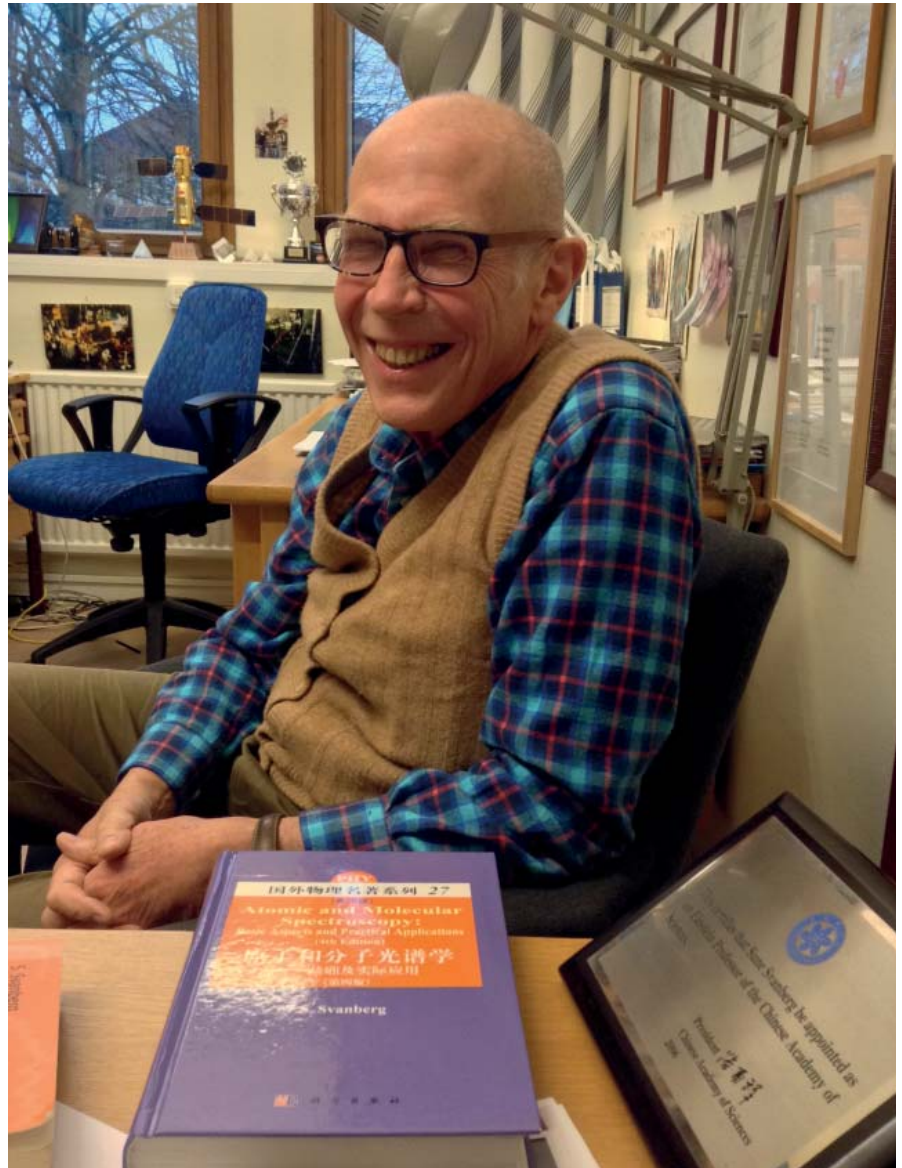
Sunes entusiasm känns tydligt när vi träffas på fysikinstitutionen vid Professorgatan i Lund. Han möter upp i huvudentrén och vi promenerar upp till arbetsrummet. Spänstig och kvick uppför trappan, trots fyllda 72 år.

Väggarna i arbetsrummet är fyllda med åtskilliga utmärkelser, priser, medaljer, hedersdoktorat och -professurer från hela världen.

Det är lätt att bli fångad av Sune Svanbergs glädje över arbetet. Det är svårt att tro att han är senior sedan flera år. Sune ser framåt och har fortfarande en ungdomlig otålighet, även om han påstår att den är mer balanserad nu.

– Jag är bättre på att ta dagen som den kommer, säger han. Varje dag känns som en bonus och han är ödmjuk inför livet. Sune har en kristen bakgrund och den kristna tron har varit till stöd i både med och motgång.

Laserspektroskopi, som är Sunes forskningsfält, har i Lund utvecklats på ett dynamiskt sätt med en mängd inriktningar inom såväl grundforskning som tillämpningar inom energi, miljö, ekologi och medicin. Mycket var tvärvetenskap och det var inte alltid lätt att finansiera detta eftersom man var mycket tidigt ute i okonventionella domäner. Med bildandet av Lunds Lasercentrum, som Sune tog initiativ till 1995, kunde en stabil plattform för verksamheten etableras.



– I utvecklande av många laser-baserade medicinska tillämpningar har min hustru Katarina stor förtjänst, säger Sune. Hon är medicinare och professor i onkologi.

– Vi såg tidigt möjligheter att tillsammans skapa en plattform för samarbete mellan fysik och medicinska tillämpningar, berättar Sune.

Det är trettio år sedan det yrkesmässiga samarbetet började. Katarina är ett utmärkt bollplank i både vetenskapliga och forskningsetiska frågor, påpekar han när vi sitter och småpratar.

– Katarina och jag har varit gifta över 45 år, avslöjar Sune med värme i rösten och vill att vi skall hälsa på hustrun som arbetar i en annan del av byggnaden. På



vägen dit berättar han om sitt pågående engagemang i Kina.

**Hur mycket tid tillbringar du i Kina och vad innebär projektet?**

– Baserat på 30 års informellt samarbete med Kina tillbringar vi nu cirka 3 månader per år i Guangzhou, berättar han. Katarina och jag har samma typ av professurer där och vi bygger tillsammans upp en verksamhet inom lasermedicin, livsmedelssäkerhet och ekologi.

– Dessutom har jag dragit igång en stor verksamhet inom luftföroreningsanalys med bl.a. laser-radar-teknik. Vi har nu 8 forskarstudierande i gruppen, och förutom handledning har vi mycket föreläsningar.

Det blir ett kort men trevligt möte med hustrun Katarina Svanberg. Hon kompletterar bilden av Sune. Katarina berättar att de ofta tycker väldigt olika om saker och ting och är även olika som personer.

– Troligen kompletterar vi varandra på ett bra sätt med våra olika personligheter, säger hon. Vi ger varandra också stor frihet.

– Men hemma är det Katarina som håller koll på allting inklusive ekonomin, inflikar Sune och ser synnerligen nöjd ut.

Under samtalet avslöjar Katarina några personlighetsdrag som utmärker hennes make. Ödmjukhet, entusiasm och envishet, men även ett stort behov av lärande. Han ger inte upp, förtydligar hon avslutningsvis innan vi ger oss ut i regnet.

Vi hastar vidare in på Bytaregatan 14 för en sen lunch, när Sune avslöjar att han

kan jobba väldigt länge utan både mat och sömn. Tiden vill inte räcka till helt enkelt.

**Finns det några fördelar med att vara senior forskare?**

– Jag tycker att det är härligt när man startat upp en verksamhet och efter ett tag kan lämna över ledningen och se när medarbetare lyfter sig och utvecklas till duktiga forskningsledare. Det är en mycket skön känsla.

Sune har varit ledamot i KVAs Nobelkommitté i fysik under tio år varav två år som ordförande. Under vår promenad berättar han om hur mycket intressant man tvingades hålla sig uppdaterad kring inom fysikforskningen. Långt utanför den egna forskningen.

– Åren i Nobelkommittén gav en unik kunskapsmassa och man känner stor ödmjukhet inför alla duktiga forskare i världen, konstaterar han.

**Hur ser du på framtiden för svensk fysikforskning?**

– Det ser lovande ut, men det är viktigt att nya generationer av studenter är villiga att satsa lika hårt i tid och energi som skedde för 40-50 år sedan, poängterar han.

**Vad har du för bakgrund?**

– Jag kommer från de djupa skogarna i Västergötland, berättar Sune. Väne Åsaka där jag föddes låg isolerat och det var långt till allting. Mina första 3 år var faktiskt i ett hus utan elektricitet. Pappa var trädgårdsmästare och mamma hade mot alla odds tagit sig till Stockholm och examinerats till småskollärlarinna.

**Vad hade du för intressen som barn?**

– Jag var intresserad av praktiska ting, tillverkade många saker i trä som barn och hade ett ganska avancerat kemilaboratorium hemma i källaren vid tretton års ålder, berättar han.

**Var det något särskilt som gjorde att du läste vid universitet?**

– Mina föräldrar uppmuntrade mig till ”att vara duktig i skolan” under hela min uppväxt, men hade väl liksom jag själv inget större begrepp om vad ett universitet var, berättar Sune.

**Varför det blev det studier i fysik?**

– Det var nog bra lärare i matematik och naturvetenskap vid gymnasiet i Trollhättan, som gjorde att jag lockades till naturvetenskapen, tror Sune. Generellt sätt är möjligheten i Sverige att få läsa vad som helst på avancerad nivå fantastiskt. Även om förutsättningar inte finns i den miljö som man växt upp i, reflekterar Sune.

Den kristna tron är en stark drivkraft och Kristus är Sunes ständige följeslagare. Känslan under vårt samtal förmedlar tro, hopp och kärlek.

Tro på individens kraft att resa sig och förbättra sin livssituation.

Hopp om att världen skall bli bättre även om det är med små steg.

Kärlek till livet och tacksamheten inför vad som man får och fått uppleva.

**Tack för ett härligt samtal!**

MARGARETA KESSELBERG  
FYSIKAKTUELLT

**Några fakta om Sune Svanberg**

**Född:** 1 januari 1943

**Familj:** hustru Katarina, två döttrar, fyra barnbarn

**Bostad:** villa i Lund, fritidsställe i Bohuslän

**Utbildningsbakgrund:**

- Gymnasium i Trollhättan (1962)
- Fil.kand vid Göteborgs universitet (1966)
- Filosofie doktor i fysik, Göteborgs universitet/Chalmers (1972)
- Docent i fysik (1972)

**Urval av tidigare arbeten:**

- Postdoc Columbia University, New York, USA

- Gästprofessor, Stanford University, USA
- Professor i atomfysik och chef för Atomfysikavdelningen vid universitetet i Lund (1980-2008)
- Förestandare Lunds Lasercentrum (1995-2010)

**Nuvarande arbete:**

- Senior professor, Lunds universitet, deltid (2010-)
- Distinguished professor vid South China Academy of Advanced Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou, Kina, deltid (2011-)

**Urval av tidigare uppdrag:**

- Nobelpriskommittén för Fysik 10 år (varav två som ordförande)
- Ledamot i European Research Council (ERC) och ordförande i panelen "Fundamental constituents of matter"
- Styrelseledamot i spinn-off-företagen Gasporox och Spectracure
- Styrelseledamot Vetenskapsrådet, Rymdstyrelsen och Mitthögskolan

**Framtidsplaner:** Fortsatta aktiviteter inom tillämpad laserspektroskopi i Lund, Kina och Afrika. Barnbarnen, resor, språkstudier, målning och memoarskrivande.

# 2016 invigs MAX IV-anläggningen i Lund

Möjligheten att i en accelerator perfekt kontrollera en stråle av elektroner och på så sätt styra egenskaperna på det ljus som elektronerna sänder ut har fått Sverige att investera stora resurser i en 528 m stor accelerator för att producera ljus.

För att undersöka egenskaperna hos material kan man använda olika tekniker. Eftersom de flesta atomer har skal med ett större antal elektroner som lätt kan växelverka med fotoner, ljus, är just elektromagnetisk strålning ett utmärkt verktyg. Nuvarande MAX-lab tar emot 1000 forskare från hela världen som behöver den intensiva ljuskällan och de olika instrument som finns tillgängliga vid de tre acceleratorerna MAX I, MAX II och MAX III. Behovet är stort och önskan att nå högre prestanda, mer intensivt ljus, mindre fokus och fler experimentstationer har startat utbyggnaden av ett helt nytt laboratorium: MAX IV.

## Ljus

Vi är omgivna av ljus: naturligt ljus från solen, artificiellt ljus från lampor och ”tekniskt ljus” från bland annat radiosändare och röntgenapparater. 1947 vid General Electric i New York såg man dock för första gången ljus från en accelerator, det som skulle komma att kallas synkrotronljus. (Anekdoten säger att fysikerna som körde maskinen inte vågade titta själva, utan skickade in en av teknikerna som på så sätt blev den förste att ”se ljuset”.)

De elektromagnetiska fälten runt en



elektron förändras när elektroner rör sig och accelererar. Denna förändring av fälten uppfattar vi som ljus. Ibland synligt ljus men lika ofta infrarött eller ultraviolett och röntgen. I en glödlampa där elektronerna rör sig på grund av värme utsänds svartkroppsstrålning och de våglängder (spektrum) vi får är beroende av temperaturen (ca 3000 K) vilket ger oss synligt och infrarött ljus. I mobilantenner rör sig elektronerna långsammare vilket ger längre våglängder, radiovågor, och i röntgenapparaten bromsar de in abrupt vilket ger kortare våglängder, röntgen.

För att förfinas egenskaperna på ljuset använder man olika metoder där en gemensam nämnare är att elektronerna separeras från atomerna och styrs för optimal ljusutsändning. Detta sker inte bara i en accelerator utan även i t ex laserbaserade källor där man formar ett plasma för att nå våglängder som inte är tillgängliga genom att bara använda elektroner bundna i atomer eller molekyler.

När elektronerna är fria består ”ljuskällan” enbart av elektroner i en stråle eller puls. Genom att styra och kontrollera

*MAX IV laboratoriet hösten 2014. De två ringarna och linjäracceleratorn är markerad. Foto: Perry Nordeng, 2014.*

elektronerna kan man styra egenskaperna på ljuset.

## Relativistiska processer

Om elektroner accelereras till höga energier, flera gånger dess vilomassa, så att de blir så kallat relativistiska förändras ljuset som vi uppfattar det i laboratoriet. Vi får ett ”dopplerskift” av både våglängden (till mycket kortare) och utbredning (till en smal kon i framåtriktningen).

Genom att, som i MAX IV, accelerera en elektron till 6000 gånger sin vilomassa förkortas våglängden 6000 gånger. Dvs synligt ljus blir till röntgen (600 nm  $\rightarrow$  1 Å) och öppningsvinkeln minskas till 1/6000 radianer (0.01 grader)

## Acceleratorn

Acceleratorn består av några grundelement: kaviteter med elektriska fält för att



*Elektronkanonen (tv) och början av linjäracceleratoren i MAX IV. Foto: Annika Nyberg*

accelerera elektronerna, dipolmagneter med konstanta fält för att styra dem, kvadrupolmagneter som fungerar som magnetiska linser och speciella magneter för att styra utsändningen av ljus.

Elektronerna extraheras och accelereras i en injektor som oftast är en kombination av flera accelerators. I MAX IV används en elektronkanon och en linjäraccelerator. Kanonen skapar ett tåg av 5 ps långa pulser som sedan accelereras till full energi i den 250 m långa linjäracceleratoren. Elektronerna injiceras sedan i lagringsringen och vertikala magnetfält från magneter med två poler, dipoler, styr elektronerna runt ringen. Eftersom böjningsvinkeln beror av elektronenergin så uppträder det vi kallar dispersion, olika banor för olika energier.

Linser för elektronoptik är magnetiska och för att fokusera elektronstrålen används oftast magneter med fyra poler, kvadrupolmagneter. En egenhet med dessa är att när de fokuserar i ett plan så defokuserar de i det andra. En magnet som fokuserar horisontellt, defokuserar alltså vertikalt. Det betyder att man be-

höver använda flera linser för att fokusera i båda planen och att optiken inte blir symmetrisk. Magnetoptik lider av samma defekter som ljusoptik, t ex kromatiska effekter, där elektroner med olika energi får olika fokallängd. Precis som i ljusoptik kan man motverka dessa effekter med hjälp av linser med andra former: sextupol- och oktupolmagneter med sex respektive åtta poler.

Elektronerna i en accelerator kan bara överleva en längre tid om det är mycket bra vakuum där de färdas. Därför består hela acceleratoren av ett vakuumrör som kontinuerligt pumpas för att hålla ett tryck motsvarande det i yttre rymden.

## Ljusutsändning

Ljuset skapas då elektroner passerar en magnet och "skakar" till. Detta sker på flera ställen runt maskinen men kan optimeras på olika sätt beroende på vad man vill förbättra. Vill man nå mer röntgenljus placerar man ett par starka magneter, en sk wiggler, där elektronens bana abrupt svänger fram och tillbaka. Vill man i stället öka intensiteten, briljansen, använder man många mindre svagare magneter i serie. Genom att ljuset från varje



*En kvadrupolmagnet längs linjäracceleratoren i MAX IV. Foto: Johan Persson.*

magnet kan interferera (samverka i fas) så kan intensiteten öka med flera storleksstorleksordningar. Dessa magneter kallas undulatorer.

## MAX-lab historia

1987 startade MAX I acceleratoren att producera ljus till de första entusiastiska användarna. MAX I var ett hemmabygge och första steget på en lång väg i jakten på bättre och bättre ljuskällor.

Utvecklingen har sedan gått snabbt. 1997 startade MAX II som är betydligt kraftfullare och optimerad för speciella magneter, undulatorer, för att kontrollera

ljusets egenskaper. Ytterligare tio år senare kom MAX III för att öka kapaciteten och utveckla metoder för det om skulle bli MAX IV. Samtidigt ersattes den gamla elektronkällan, en racetrackmikrotron som flyttat med från fysiska institutionen i Lund, med en modern linjäraccelerator, linac, och en radiofrekvens (RF) kanon, också detta förberedelser för de nya tekniker som var nödvändiga i utvecklingen av MAX IV.

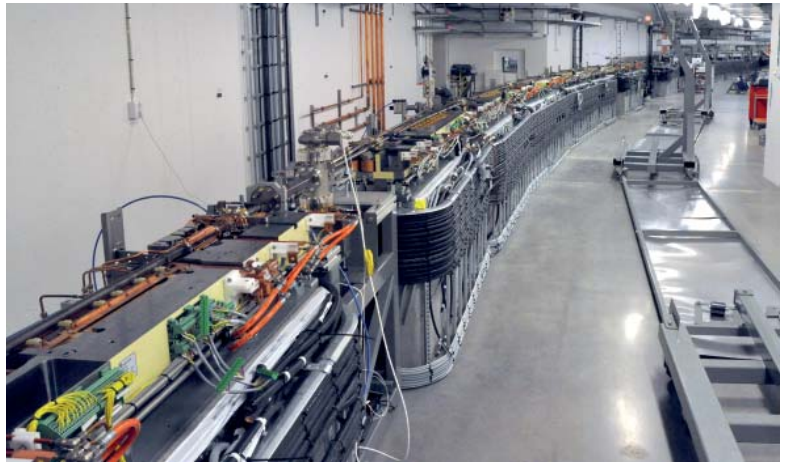
Nu ser vi MAX IV som inte är bara en ring utan ett helt nytt laboratorium. Två ringar, modernast i världen, och en av Europas kraftfullaste linjäracceleratorer som lägger grunden även för framtida utveckling. Linjäracceleratorn förser både den mindre 1.5 GeV ringen, med 96 m omkrets, och den större 3 GeV ringen, med hela 528 m i omkrets, med elektroner. Ringarna är nästan tre ringar då den mindre samtidigt byggs i två exemplar där den andra sätts ihop till SOLARIS i Krakow, Polen.

MAX IV är en ljuskälla i vilken elektronerna accelereras och styrs för att optimera ljusutsändningen så att ljusets egenskaper passar undersökningarna av material i olika form.

## Vad gör MAX IV så speciell?

Elektronstrålen är själva ljuskällan (lampan) i systemet och det är viktigt att denna är så liten och väldefinierad som möjligt samtidigt som den är stabil och har hög intensitet. Emmittansen berättar hur stor strålen är och hur parallellt elektronbanorna går. En låg emittans är nödvändigt för att kunna fokusera elektronstrålen och på så vis nå en liten ljuskälla som medför att ljuset kan fokuseras till ett mycket litet fokus. Elektronstrålen i MAX IV varierar runt maskinen men är ungefär 20  $\mu\text{m}$ .

Flera processer sker inom elektronstrålen. Elektroner med olika energi oscillerar runt olika jämviktsbanor. Idealt skall elektroner med olika energi följa samma bana, men dispersionen i systemet gör att så inte är fallet. Problem uppstår då när en elektron sänder ut ljus (en foton). Den tappar då energi och börjar följa en ny bana. Är skillnaden mellan banorna stor



(stor dispersion) så blåser elektronstrålens storlek upp  $\rightarrow$  emittansen ökar. Det är just detta som MAX IV hanterar bättre än de flesta andra ljuskällor genom en optik där dispersionen minimeras. För att nå dit behöver man många, små och starka magneter. Eftersom en mindre emittans medför att strålens storlek minskar öppnar det möjligheter att minska magneternas storlek och mindre starkare magneter gör att man kan minska emittansen... i princip en positiv spiral, men samtidigt ökar elektrondensiteten i strålen och andra problem dyker upp vilka tagit år av designstudier för att lösa och hantera.

Det koncept som är utvecklat vid MAX IV sprider sig nu över världen. Från den nya ringen SIRIUS i Brasilien, via uppgraderingen av ESRF i Grenoble till förbättringen av Spring-8 i Japan, alla tar de upp designidéerna från MAX IV.

## Vart är vi på väg?

Även om synkrotronljus från en accelerator som MAX IV har nya och revolutionerande egenskaper ser vi att utvecklingen går vidare. Dels i riktning mot ringar med ännu mer förfinade egenskaper och en bättre integrering av experimentstationerna med accelerators egenskaper. Dels mot nya typer av ljuskällor som frielektronlasern (FEL). Drömmen är en röntgenlaser. Synkrotronljuset från en lagringsring är inte fullständigt koherent och det är svårt att nå pulser kortare än ett par pikosekunder. Med laserteknik kan man göra detta men det är en utmaning att nå röntgenområdet speciellt med

*Några magnetsektioner i 3 GeV ringen i MAX IV. Överdelen av magneterna är avlyft och vakuumröret synligt. Foto: Annika Nyberg.*

intensiteter motsvarande en accelerator. En FEL kan däremot göra just detta vid röntgen våglängder och dessutom öka intensiteten med flera storleksordningar. Forskare börjar nu planera unika experiment som att göra 3D-filmer med holografiska metoder som följer enskilda atomer under tiden en kemisk reaktion sker.

En FEL är i grunden relativt enkel. En elektronstråle från en linjäraccelerator skickas in i en lång (50-100m) lång undulator. Om egenskaperna är de rätta kan man få ljuset att förstärka sig självt koherent med hjälp av elektronerna. Eftersom elektronerna är helt fria finns i princip ingen begränsning för de våglängder man kan arbeta vid. En hake är däremot att kraven på egenskaperna för elektronstrålen är mycket höga. Ett annat problem är att styra själva ljusutsändningen och inte låta lasern starta från brus, utan med väldefinierade egenskaper. Linjäracceleratorn i MAX IV är byggd för att kunna skapa dessa elektronstrålar och forskning på kontrollen av en FEL har pågått i många år. Det finns i dagsläget två röntgen-FEL i världen: LCLS i Stanford och SACLA i Japan. Ytterligare tre är under uppbyggnad: XFEL i Hamburg, SwissFEL i Schweiz och PALFEL i Sydkorea. MAX IV laboratoriet har påbörjat designstudier av en röntgen-FEL i Lund.

SVERKER WERIN  
PROFESSOR I ACCELERATORFYSIK  
LUNDS UNIVERSITET



Figur 1: IR-sensorn på TV:n syns till vänster om kontrollampan. Framför sensorn sitter en konvex lins för att ge ett bredare siktfält.

# Osynlig kommunikation

För att kommunicera med lyftkranar, garageöppnare, billås/larm, strömbrytare, luftkonditionering, hörlurar, dörrklockor etc. används olika typer av fjärrkontroller. De utnyttjar antingen infrarött ljus (IR) eller radiofrekventa vågor (RF). NFC-teknik (Near Field Communication), som används vid mycket korta avstånd exempelvis vid dörröppnare och läs samt i kollektivtrafiken, berörs inte här.

Under andra världskriget, detonerades bomber och minor med hjälp av fjärrkontroller. Efter Sovjets attack mot Finland 1939 återtog finländarna Viborg den 31 augusti 1941, när fortsättningskriget inletts. Dock hade mängder av sovjetiska radioutlösta bomber och minor placerats i området. Dessa skulle detoneras av den sovjetiska armén genom radiosignaler på en särskild frekvens. För att kunna desarmera bomber och minor spelade finsk radio *Säkkijärven polkka* oavbrutet på denna frekvens, dygnet runt, i månadsskiftet augusti/september 1941 för att störa ut radiosignalerna, vilket man i stort lyckades med. Är det nå-

gon av Fysikaktuelltts läsare som vet mer och förstår tekniken bakom dessa minor?

I slutet av 50-talet kom fjärrkontroller för TV med ultraljud, dock inte uppskattat av alla hundar. På 80-talet slog IR-tekniken igenom och numera finns kontroller med antingen IR eller RF.

## Radiostyrda fjärrkontroller

I Sverige finns licensfria frekvenser bl.a. inom det s.k. ISM (Industrial, Scientific and Medical) i band runt 0,9, 1,8, 2,4 och 5,8 GHz och där samsas wifi, trådlösa telefoner, högtalare, mikrougnar, datormöss, tangentbord, garageöppnare, strömbrytare, larm m.fl. Trängseln kan bli stor och exempelvis fjärrkontroller till billarm sänder i de flesta fall på frekvenser runt 434 MHz. Olyckligtvis brukar 90 – 95 procent av alla trådlösa billarm vara fabriksinställda på en och samma kanal, mitt i bandet 433,05 – 434,79 MHz. När flera trådlösa sändare används samtidigt inom 100 – 200 meters avstånd kan det bli ”trafik-stockning”, och signalerna kommer inte fram. Eftersom de olika

fjärrkontrollerna är kodade på olika sätt kan man normalt inte öppna varandras bilar eller stänga av varandras larm. Utöver detta kan andra typer av sändare på detta band störa eller blockera framkomligheten. När man köper nya trådlösa produkter bör man alltså köpa modeller som har en frekvens- eller kanalomkopplare. Då kan man koppla om till en ledig och störningsfri frekvens om det dyker upp annan sändning från okänt håll.

## Infraröda fjärrkontroller

IR-kontrollerna kräver rakt siktfält mot sensorn i mottagaren (figur 1), men de fungerar även via reflektioner mot speglar, glasytor etc. Någon risk att grannens TV eller annan apparatur ska påverkas föreligger därför inte. Nackdelen är räckvidden, och s.k. IR-förlängare med en IR/RF-omvandlare utnyttjar att RF-signaler kan ta sig fram genom väggar och mellan våningar. Vid den apparatur som ska styras har man sedan en RF/IR-omvandlare vars IR-signaler uppfattas som om de kom från fjärrkontrollen. Härigenom

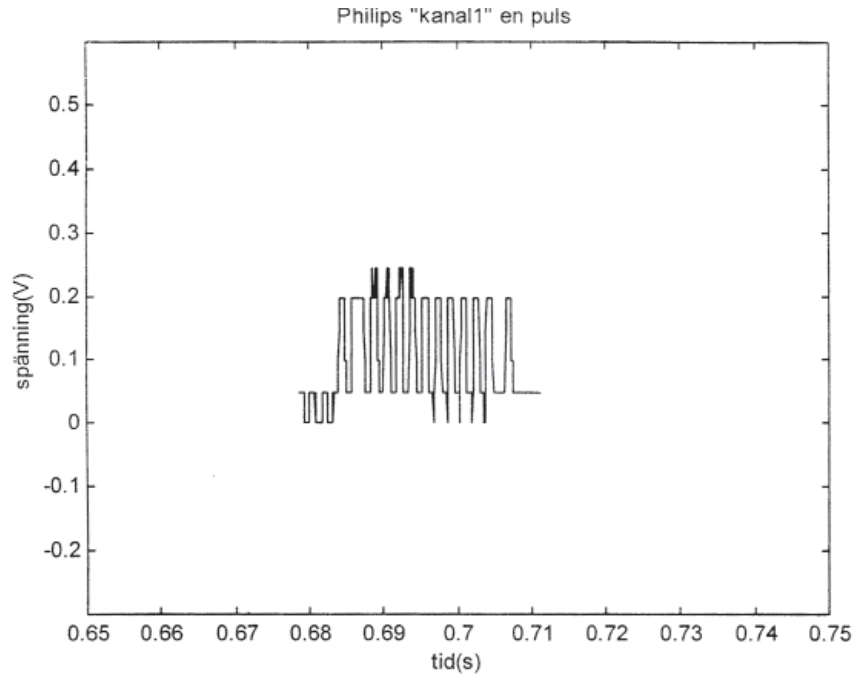
kan apparater i andra rum eller inbyggda i skåp styras. En fiffig variant är ett RF-batteri (AA eller AAA), som passar i fjärrkontrollen och som innehåller en cell samt en RF-sändare. Sändaren känner av strömökningen när IR-dioden tänds och på så sätt fås samtidigt IR- och RF-signaler. Det finns numera universalfjärrkontroller som kan lära sig signalerna från andra fjärrkontroller och därmed behöver man bara en enda fjärrkontroll.

IR-dioden i fjärrkontrollen sänder runt 940 – 980 nm, våglängder som inte syns utan hjälpmedel. Med en digitalkamera ser IR-ljuset violett ut (figur 2), när man nog hade väntat sig rött. Kameran, i likhet med en dator eller TV-skärm, lurar ögat genom att bygga upp bilden av punkter som ges lämpliga proportioner rött, grönt och blått. Nysningar brukar inte uppskattas av omgivningen, men försök på annat sätt placera små vattendroppar på bildskärmen. Dropparna kommer att lysa i olika färger beroende på från vilket håll de betraktas.

För att skapa färger i kameran finns ett rött, ett grönt och ett blått filter. Varje filter har en känslighetskurva, och med kännedom om dessa kurvor kan ögats känslighet efterliknas vid bildkonstruktionen. Det röda filtret har störst känslighet av de tre filtren över större delen av det synliga området och därför dämpas den signalen i vanliga fall. Vid våglängder runt 950 nm däremot, har alla tre filtren nästan lika stor känslighet och släpper därmed fram lika stor insignal. Då kameran är ovetande om detta, dämpar den



Figur 2: IR-ljuset från fjärrkontroller verkar lysa violett sett med en digitalkamera



Figur 4: Pulsen från en TV-fjärrkontroll från Philips registrerad med ett oscilloskop.

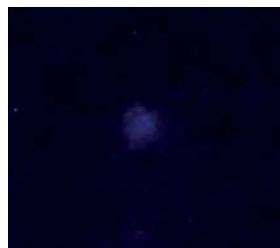
som vanligt den röda signalen, och resultatet blir att ljuset verkar violett.

IR-frekvenser finns även i solljus, och på äldre apparater sitter en liten röd plastbit framför IR-mottagaren i ett försök att filtrera bort oönskat ljus. Numera används pulskodning (PWM), för att minska störningar från omgivande ljus. På en bärvåg, vanligen 36 – 38 kHz, överlagras digitala pulser som svarar mot binära koder. IR-mottagaren accepterar bara rätt bärvågsfrekvens och rätt överlagrad IR-frekvens. Känsligheten sjunker snabbt på ömse sidor om ”mittfrekvensen” för bärvågen, och kring rätt våglängd för IR-dioden.

En fördel med PWM är att lysdioden kan svalna del av tiden. Den kan därför

tolerera starkare ström och ge ett starkare ljusflöde när den väl lyser. Sändaren är alltså ganska stark och mottagaren mycket känslig. Man kan faktiskt hålla ett antal 80 grams A4-papper mellan sändare och mottagare och signalen går ändå fram. I figur 3 syns IR-ljuset från fjärrkontrollen som ett svagt violett ljus.

Bärvågen har hög frekvens, medan det överlagrade pulståget som innehåller informationen har pulslängder på några 100-dels sekunder. Lyser man in i en digitalkamera ser man ett snabbt blinkande ljus. I figur 4 har en sådan blinkning/puls från en fjärrkontroll registrerats med ett oscilloskop. I figuren syns att pulsen har en finstruktur med kortare pulser inom den stora pulsen, vars inbördes avstånd avgör om de ska tolkas som en nolla eller en etta. Philips ofta förekommande RC5-protokoll har fjorton bitar, med pulser som varar omkring 25 ms och upprepas efter omkring 100 ms, beroende på bärvågens frekvens. En sekvens har två startbitar, en växelbit, fem adressbitar och sex kommandobitar.



Figur 3: IR-signalen efter passage genom fem 80 grams A4-papper.

MAX KESSELBERG  
FYSIKUM  
STOCKHOLMS UNIVERSITET

# Att stapla apelsiner: Ett 400 år gammalt problem är löst



Bild 1

På bild 1 ser du hur apelsiner kan staplas till en pyramid. Människor har i alla tider spontant staplat kanonkulor, frukter och andra sfäriska föremål på detta sätt. Hur beskriver vi apelsinernas lägen? För att göra analysen, börjar jag med en enklare situation. På bild 2a ser du hur jag på Fysikaliska leksaker, Chalmers, har packat  $6 \times 8 = 48$  burkar inom en ram. Burkarna står i ett kvadratisk mönster och täcker cirka 78,5% av ramens yta. Tror du det är möjligt att i ramen också få in de två burkarna till höger i samma ram? Fundera lite på detta innan du läser vidare. Jo, det går om du istället utför packningen som på bild 2b, d v s i ett sexkantigt mönster. Då fyller burkarna cirka 90,7% av ytan och vi har uppnått den tätaste packning som är möjlig.

Nu är vi redo för apelsinproblemet på bild 1. Man kan starta med att först lägga apelsinerna i ett lager på samma sätt som burkarna på bild 2b. På detta lager lägger vi sedan ett likadant lager, men förskjutet så att apelsinerna där ligger rakt över hålrummen i det undre lagret. Vi fortsätter sedan att stapla flera lager enligt samma princip och vi kan bygga till exempel py-



Bild 2a



Bild 2b

ramiden på bild 1. Vi får då en densitet på cirka 74,0 %. Johannes Kepler föreslog år 1611 att den beskrivna packningen är den som har den största densiteten av alla möjliga packningar av sfärer i tre dimensioner.

Det har visat sig mycket svårt att teoretiskt bevisa att Keplers påstående är sant. Detta sägs vara det äldsta problemet i diskret geometri. Kanske skulle man kunna flytta sfärerna ytterst lite från sina lägen så att man fick en ännu större densitet? Thomas Hales vid University of Pittsburgh i USA publicerade år 2005 en artikel där han hävdade att Keplers antagande var korrekt och att man alltså inte kan hitta en tätare packning än den vi beskrivit här. Beviset är på 300 sidor och det tog 12 utvärderare hela 4 år att fastställa att beviset var "till 99% korrekt". Så Hales fortsatte att leta efter ett 100%-igt bevis (Flyspeck project). Nyligen (augusti 2014) fastställde Hales och medarbetare att Kepler hade rätt. Ett 400 år gammalt problem är löst!

Ett mer praktiskt staplingsproblem



Bild 3

gäller hur stor del av ett kärl som kan fyllas om man slumpmässigt håller i sfäriska föremål, till exempel apelsiner, se bild 3. Problemet har engagerat matematiker sedan bibliska tider (Lukasevangeliet). Den accepterade uppfattningen har varit att om man skakar omsorgsfullt så kommer man alltid att uppnå en maximal densitet på 64 procent. Sal Torquato vid Princeton-universitetet i USA ha dock nyligen vänt upp och ned på det gängse tänkandet och påpekar att konceptet "slumpmässig" har hittills använts alltför vagt. Han rapporterar att slumpmässiga packningar kan ge densiteter som varierar mellan 64 procent och 74 procent. Forskarna tror nu att resultaten kan få viktig inverkan på hur man framställer och testar nya material.

PER-OLOF NILSSON  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

## PASCO spektrometer

PASCO har tagit fram en mycket prisvärd och användbar spektrometer för skolbruk som lämpar sig för såväl fysiker som kemister och biologer.

Med PASCOs nya spektrometer kan ni genomföra försök med intensitet, absorbans, transmittans och även fluorescence (två excitationsvåglängder 405 resp 500 nm).

Spektrometern har inbyggd blåtand men kan även kopplas via USB.  
Bandbredd 380-950 nm, 2-3 nm FWHM.

PS-2600 Spektrometer (inkl. fiberkabel, 10 st kuvetter och mjukvara) kostar 5 785 kr (exkl moms).

