

Nobelpriset · Drömmen om Marsresan · Supraledare

Fysikaktuellt

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDET

NR 4 • DEC 2022



Julens godaste fysik

ISSN 0283-9148

601021

258891

4

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: Jonathan Weidow,
jonathan.weidow@chalmers.se

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

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

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

Bankgiro: 5402-5499

E-post: styrelsen@fysikersamfundet.se

För medlemsfrågor, kontakta Lage Hedin, 076-231 01 37
eller medlemsregistret@fysikersamfundet.se

Sektioner

Inom Fysikersamfundet finns ett antal sektioner som bland annat ordnar möten och konferenser, se www.fysikersamfundet.se för mer information.

Kosmos

Fysikersamfundet ger ut årsskriften Kosmos.
Redaktör är Anders Kastberg.

Fysikaktuellt

Vår medlemstidning utkommer med fyra nummer per år, och distribueras även till alla gymnasieskolor med naturvetenskapligt eller tekniskt program.

Redaktion: Christina Kjellstrand, Måns Henningson,
Johan Mauritsson, Anne-Sofie Mårtensson,
Asta Pellinen Wannberg och Elisabeth Rachlew.

Ansvarig utgivare: Jonathan Weidow.

Kontakta redaktionen via:
fysikaktuellt@fysikersamfundet.se

För insänt, ej beställt material ansvaras inte.

Manusstopp för Fysikaktuellt 1/2023 är 10 januari.

Medlemskap

Svenska Fysikersamfundet har ca 1 000 individuella medlemmar, stödjande medlemmar (företag och organisationer) och stödjande institutioner. Årsavgiften är 400 kr, dock 250 kr för pensionärer och forskarstuderande, samt 100 kr för grundutbildningsstudenter. Stödjande medlemskap debiteras 4 000 kr per år.

Bli medlem genom ansökan på:
www.fysikersamfundet.se/bli-medlem/ eller med qr-koden.



Medlemsförmåner

- Fysikaktuellt 4 nummer/år
- KOSMOS
- 10 % rabatt på böcker hos Fri Tanke förlag. Ange koden "fysikersamfundet" i kassan på fritanke.se.
- Förmånsprenumeration på Forskning & Framsteg. Erbjudandet gäller 10 nr (20% rabatt). Länk till beställningssida: <http://fof.prenservice.se/KodLandning/Index?Internetkod=057-0571329>

Layout: Christina Kjellstrand

Tryck: Trydells, Laholm 2022



OMSLAGSBILDEN: Göra fysikexperiment med julchokladen? Ja, varför inte!

Läs mer på sidan 18.

Foto: Johan Mauritsson

Stödjande medlemmar

- Gleerups Utbildning AB
www.gleerups.se
- Scanditronix Magnet AB
www.scanditronix-magnet.se
- Myfab, www.myfab.se

Stödjande institutioner

- Chalmers tekniska högskola – Institutionen för fysik
- Chalmers tekniska högskola – Institutionen för rymd och geovetenskap
- Chalmers tekniska högskola – Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap – MC2
- Göteborgs universitet – Institutionen för fysik
- Högskolan i Halmstad – IDE-sektionen
- Institutet för rymdfysik, Kiruna
- Karlstads universitet – Institutionen för ingenjörsvetenskap och fysik
- Kungliga tekniska högskolan – Institutionen för 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)
- Linnéuniversitetet – Institutionen för fysik och elektroteknik
- Luleå tekniska universitet – Institutionen för teknikvetenskap och matematik
- Luleå tekniska universitet – institutionen för system och rymdteknik
- Lunds universitet – Fysiska institutionen
- Lunds universitet – Institutionen för astronomi och teoretisk fysik
- Nordita, Nordic Institute of Theoretical Physics
- Stockholms universitet – Fysikum
- Uppsala universitet – Institutionen för fysik och astronomi
- Umeå Universitet – Institutionen för fysik

Glöm inte att anmäla adressändring till medlemsregistret@fysikersamfundet.se

Innehåll

- 3 **SIGNERAT**
Simon Holmström
- 4 **AKTUELLT**
- 7 **NOBELPRISET 2022**
De öppnade vägen
för kvantinformatiken
- 12 **HUR GÅR DET MED
MARSRESORNA?**
- 14 **AVHANDLINGEN**
Mathias Hoppe om
skenande elektroner
- 18 **GOD FYSIK**
Choklad
- 21 **ULTRASNABB
FOTOGRAFERING**
- 24 **SUPRALEDNING VID
STARKA MAGNETFÄLT**
- 26 **MEDICINSK FYSIK**
Modern strålbehandling
- 28 **HÅRDA FYSIKKLAPPAR**
att lägga under granen
- 30 **VARDAGENS FYSIK**
Säkert med LED-ljus



När kommer vi egentligen kunna göra Perseverance sällskap på Mars? Läs mer om svårigheterna med långa rymdresor på sidan 28.

Teorin om platt jord i undervisningen

Sedan några år tillbaka tar jag upp plattjordsteorin i min astronomi-undervisning. Varför gör jag det när det är en vedertagen sanning att jorden är rund?

Jag har undervisat i fysik på gymnasienivå i snart 23 år och elevernas frågor gör att jag ständigt tar upp nya perspektiv och företeelser i undervisningen. En företeelse som har dykt upp på senare tid är plattjordsteorin. För några år sedan hade jag ett samtal med en elev som återgav hur han hade hamnat i diskussion med en person som var övertygad att jorden var platt. Min elev blev ställd över att man kan tro att jorden är platt, trots att man i tidig ålder får lära sig att jorden är rund. Personen lät sig inte övertygas om att jorden var rund och hade dessutom flera argument för att jorden var platt. Min elevs berättelse gjorde mig nyfiken på plattjordsteorin och jag satte mig in i vilka grunder den bygger på. Plattjordare anser att det är mer logiskt att jorden är platt, i och med att vi uppfattar att vår närmsta omgivning är platt. Det finns också personer inom plattjorderörelsen som utför experiment med syfte att visa att jorden är platt. Hittills har ingen lyckats. Samtidigt avfärdar plattjordare observationer och experiment som stödjer att jorden är rund.

Ur ett undervisningsperspektiv tycker jag att plattjordares argumentation för att jorden är platt är intressant, till exempel hur man avgör vad som är sant. En sanning är en sanning tills motsatsen bevisas, vilket plattjordare använder som argument för att fortsätta att leta efter experimentella stöd för att jorden är platt. Jag tog mig en funderare på vilka fysikexperiment och observationer som jag tar upp i undervisningen och vad jag själv har stött på under min egen skolgång. Några exempel är jordens tidszoner, Erathostenes mätning av jordens omkrets och Foucaults pendel. Samtidigt insåg jag att man sällan behöver använda sina fysikkunskaper



"Plattjordare anser att det är mer logiskt att jorden är platt."

för att argumentera för att jorden är rund.

Elevens berättelse har fått mig att inse vikten av vetenskapsteoretiska perspektiv i undervisningen och att träna elevers färdighet att argumentera utifrån sina experiment och observationer. I dagens samhälle blir kunskap och argumentationsfärdigheter allt viktigare för att kunna värdera information, och för att argumentera för vad som är sant eller falskt. Därför är plattjordsteorin sedan några år ett stående inslag i min undervisning. Dels för att det är intressant, dels för att det är nödvändigt.

Simon Holmström

SIMON HOLMSTRÖM
Katedralskolan, Växjö



Helgen innehöll allt från föreläsningar till praktiska moment. Här Hanaa Alrajeh och Ghna Alaallaf i labbet.

Premiärsuccé för nytt fysikläger

Sveriges största träningsläger i fysik för gymnasister gick av stapeln den 29 september, och premiärupplagan blev en succé. 70 nyfikna ungdomar kom till Göteborg för en långhelg av föreläsningar, räkneövningar och sociala aktiviteter. Fysik- och astronomiläger har gjort entré i Fysiksverige.

Det var under ett liknande läger för matematik i våras som det slog lägrets grundare och projektledare, Benjamin Verbeek, att ett utbildningsläger för fysik- och astronomiintresserade ungdomar saknades i Sverige. Lägrets syfte är att locka en bred grupp av redan intresserade gymnasieungdomar från hela Sverige och förvalta deras intresse i ett tidigt stadium, för att tillgängliggöra deras fulla poten-

tial. Målet är att ge dem verktyg och inspiration att fortsätta studera och tävla i exempelvis Wallenbergs fysikpris och Astronomiolympiaden.

Under fyra dagar fick deltagarna gå på föreläsningar, övningspass och laborationer. På kvällarna anordnades inspirationsföreläsningar, och bland annat en framtidskväll där föreningar från hela landet kom och berättade om de möjligheter de erbjuder för fortsatt engagemang. Här diskuterades även olika universitetsutbildningar med en panel av studenter: Vilken stad är bäst? Kandidatprogram eller civilingenjör? Sverige eller utomlands?

LÄGRET ANORDNAS av en oberoende grupp studenter med bred erfarenhet av att anordna ungdomsläger och tävlingar i nära samarbete med en unik symbios av föreningar: inte minst Svenska

Fysikersamfundet, Astronomisk Ungdom och Ung Vetenskapssport. Detta är en mötesplats inte bara för eleverna, utan även för föreläsarna, som är studenter från universitet runt om i landet. Många föreläsare har tidigare tävlat internationellt i fysik och astronomi, och diskussionerna fortsatte långt in på natten.

GLÄDJANDE VAR DEN MYCKET jämna könsfördelningen, med en i stort sett 50/50-representation. Detta skiljer sig signifikant från dagens deltagande på tävlingar och universitetsutbildningar inom fysik, något vi hoppas bidra till att ändra på. Många deltagare har visat ett stort intresse för fortsatta studier, tävlingar, och föreningsengagemang inom fysik. Söktrycket för årets läger var mycket stort, och vad vi trodde var en ambitiös mängd platser fylldes snabbt. Siktet är



Lägret, som hölls på Chalmers i Göteborg, blev snabbt fullbokat.



Under "framtidskvällen" diskuterades bland annat olika universitetsutbildningar.



Roulana Khaznadar och Isabella Fledelius-Gehrke studerar arbetet som krävs för att lyfta en flaska ur vatten.

redan inställt på ett årligt återkommande läger!

Arrangörsgruppen vill tacka alla deltagare, ledare och partners för ett mycket gott samarbete och ett läger över all förväntan. Särskilt tack till Svenska Fysikersamfundet som tidigt trodde på projektet och gav ett stort stöd med relativt kort varsel. Projektledaren vill också rikta ett stort tack till de övriga i arrangörsgruppen för ett samarbete som tycks upphäva naturlagarna. Allt arbete görs ideellt och utan ledarnas engagemang finns inget läger. Mot oändligheten och vidare!

BENJAMIN VERBEEK, JULIA
MÄRTENSSON, ADAM WARNERBRING,
NIKLAS ENGELHARDT ÖNNE
Arrangörsgruppen för Fysik- och
astronomiläger 2022

Nominera till Oseenmedaljen 2023!

Samfundets stödjande institutioner inbjuds härmed att nominera en avhandling som framlades under 2022. Förslagen skall vara inkomna senast den 31 januari.

Vinnare tilldelas Oseenmedaljen, ett diplom och en prissumma på 100 000 kr (prispengarna är från Stiftelsen Marcus och Amalia Wallenbergs minnesfond).



Avhandlingen och pristagaren presenteras dessutom i *Fysikaktuell*.

Samfundets stödjande institutioner kan nominera vardera ett bidrag. Nomineringar skickas till: Oseenmedaljen@fysiker-samfundet.se.

En kort motivering (1–2 sidor) och en länk till avhandlingen ska skickas med nomineringen.

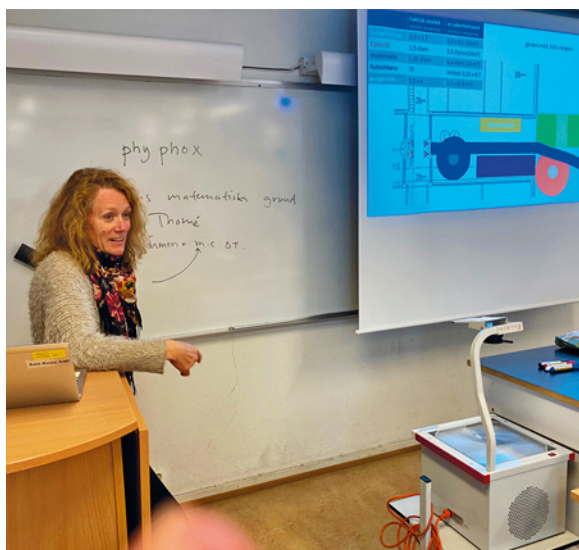
Lektorsgruppen träffades äntligen i Lund

En helg i slutet av oktober kunde undervisningssektionens lektorsgrupp samlas igen efter ett par års coronauppehåll. I år var Polhemskolan i Lund värd. Skolan har med sina åtta parallella NA- och sex parallella TE-klasser, samt sin spetsutbildning i fysik, rejält med fysik på schemat. Gruppen kunde under sin rundvandring på skolan konstatera att sex välutrustade fysiksalar och 22 anställda fysiklärare kommer väl till pass!

Helgens program spände från konkret arbete med att ta fram nya Månadens problem-uppgifter till att redogöra för och diskutera olika projekt och aktiviteter som är på gång. Bland annat redogjorde Lars Gräsjo för International Young Physicist's

Tournament (IYPT), som ger utmärkta uppslag och upplägg för gymnasiearbetet. Aref Hamawi tog upp hur samhällets energianvändning kan tjäna som utgångspunkt i undervisningen och Erik Thomé berättade om den specialiseringskurs i partikelfysik som han ger. Dessutom diskuterade gruppen hur mobilappar kan användas i fysikundervisningen och vilka förändringar som bör göras när fysikens ämnesplaner skrivs om i samband med att ämnesbetyg återinförs på gymnasiet.

I Lektorsgruppen samlas lektorer och lektorsbehöriga som är verksamma inom grundskolan eller i gymnasiet. Tag kontakt med hans.jakobsson@lund.se om du är intresserad av att vara med i gruppen!



Ami Knee, lektor vid Nössebygymnasiet i Stenungsund, redogjorde för ett av de projekt hon arbetar med: en egen fysikleksplats med gungor, karusell, rutschbana, studs-matta och gungbräda ska byggas intill skolan.

FOTO: ANNE-SOFIE MÄRTENSSON

Saknar du din medlemsavi?

■ Från och med i år skickar vi ut medlems-aviser med e-post. Om du inte har fått avin kan det bero på att du inte har meddelat e-postadress, eller har en felaktig e-post-adress i medlemsregistret. Meddela då gärna en korrekt e-postadress till kansliet på: lage.hedin@physics.uu.se. Tänk också på att kontrollera så att din avi inte råkat hamna i skräpposten!

Det går också att betala medlems-avgiften direkt till bankgiro 5402-5499. Ange då namn, adress och helst medlemsnummer.

KTH-antologi om energi

■ I somras publicerade KTH:s energiplattform och Vetenskap & Allmänhet antologin *Mot framtidens energi – den osynliga revolutionen bakom eluttaget*. I boken berättar forskare från KTH om kända och mindre kända utmaningar och lösningar kring framtidens energi. Boken kan laddas ner gratis från Vetenskap & Allmänhets webbplats: v-a.se/projekt-portal/dialogaktiviteter/energiantologi/.



Poddtipset



Sean Carroll's Mindscape

■ Fysikern och filosofen Sean Carroll samtalar med andra experter och tänkare inom allt från vetenskap till kultur.

Podden har funnits sedan 2018 och bland gamla ämnen hittar man avsnitt om bland annat svarta hål, lag och ordning i rymden och det njutningsfulla i att dricka vin.



www.preposterous-universe.com/podcast/

Fyra "kvantsäkra" krypteringsalgoritmer har valts ut av NIST

■ Kvantdatorutvecklingen går snabbt framåt. IBM har till exempel i år presenterat ett chip med 433 kvantbitar och har ett 4000 kvantbitschip planerat för 2025.

Än så länge är kvalitén på kvantbitarna sådan att man inte kan köra mer än några hundra sammankopplade operationer per kvantbit innan felsannolikheten blir för hög, men med stor sannolikhet kommer även detta att förbättras. Det Peter Shor visade med sin algoritm var att man kan knäcka RSA-krypterade¹ meddelanden med en nyckellängd på L bitar, om man har tillgång till en kvantdator med $2L$ kvantbitar där man kan utföra L^2 operationer per kvantbit. De nycklar som rekommenderas idag är av längden $L = 2048$ bitar, så IBM närmar sig med antalet kvantbitar. Det som däremot behöver förbättras är antalet felfria operationer.

Men en del säker kommunikation behöver vara säker under lång tid, till exempel personlig medicinsk data och infrastruktur. Det betyder att om man vill vara säker på att ingen kan tyda dina säkra meddelanden i framtiden bör man redan

nu byta krypteringsmetod från RSA till en kvantsäker så kallad "post-quantum" algoritm. I USA utlyste NIST (National Institute of Standards and Technology) 2016 en tävling för att ta fram sådana algoritmer. Tävligen lockade 69 tävlande algoritmer, och den 5 juli i år presenterades fyra som valts ut till standardisering, samt ytterligare fyra kandidater som ska utvärderas vidare.

Intressant är att en i den senare gruppen knäcktes av forskare i Leuven redan i slutet av juli i år.

GÖRAN JOHANSSON
Chalmers

Läs mer om de fyra NIST-algoritmerna

csrc.nist.gov/News/2022/pqc-candidates-to-be-standardized-and-round-4

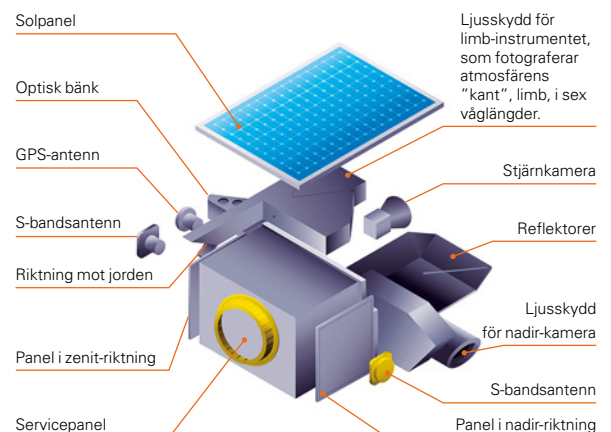
¹ RSA (Rivest–Shamir–Adleman) är en av de mest kända krypteringsalgoritmerna. Den var den första krypteringsalgoritmen som använder en nyckel för att kryptera ett meddelande och en annan för att dekryptera det.

Svensk forskningssatellit uppskjuten

■ Det svenska satellitprojektet MATS (Mesospheric Airglow/Aerosol Tomography and Spectroscopy) sköts i november upp ifrån Nya Zeeland.

Satelliten ska från en solsynkron bana på ca 600 km höjd studera vågor i atmosfären och deras inverkan på klimatet under minst två års tid.

Läs mer om MATS på rymdstyrelsen.se/upptack-rymden/sverige-i-rymden/satelliten-mats/.



Sprängskiss av MATS.

ILLUSTRATION: RYMDSTYRELSEN

De öppnade vägen för kvantinformatiken



Nobelpriset i fysik 2022 tilldelas Alain Aspect, John F Clauser och Anton Zeilinger "för experiment med sammanflätade fotoner som påvisat brott mot Bell-olikheter och banat väg för kvantinformationsvetenskap". Men vad betyder det egentligen?

Årets Nobelpris är exempel på hur forskning som inriktar sig på fundamentala men till synes helt världsfrånvända problem kan öppna nya fält för kommande, viktiga tillämpningar. Den trio som belönas i år ville under 1970- och 80-talen få klarhet i om naturen verkligen kan ha så främmande egenskaper som kvantmekaniken i vissa fall förutsäger.

Kvantmekaniken hade då existerat i cirka 50 år och hade använts med stor framgång för att göra beräkningar på alla sorters fysikaliska och kemiska system, något som också fortsatt fram till våra dagar utan att man funnit någon motsägelse mot dess förutsägelser. På 1970-talet var de flesta användare helt nöjda med läget och räknade glatt vidare, men det fanns en liten grupp mer eftertänksamma individer som tänkte lite djupare. Enligt kvantmekaniken finns det egenskaper hos naturen som inte passar in i vår vanliga föreställningsvärld; ska man då tro att verkligheten är så underligt beskaffad som kvantteorin säger?

EN AV KVANTMEKANIKENS karakteristiska drag är dess obestämdhetsprincip, mest känd i sambandet mellan en partikels läge x och dess rörelsemängd p . Relationen $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ säger att ju noggrannare vi kan mäta x (det vill säga ju mindre vi kan göra mätfelet Δx), desto större blir Δp . Vi kan med andra ord inte

bestämma p noggrant. Detsamma gäller förstås också omvänt.

Redan i kvantmekanikens barndom diskuterade man huruvida denna obestämdhet verkligen var en inneboende egenskap hos naturen eller om den hade med själva mätprocessen att göra.

I ETT KÄNT ARBETE från 1935 hävdade Albert Einstein, Boris Podolsky och Nathan Rosen (EPR) att kvantmekanikens beskrivning var ofullständig. De ansåg att varje variabel vid varje tillfälle *måste* ha ett bestämt värde ("Gud spelar inte tärning", skrev Einstein vid ett annat tillfälle) och att det därmed måste finnas en underliggande struktur som kvantmekaniken hade missat. De föreslog därför att man skulle mäta summan $x_1 + x_2$ och vektorsumman $p_1 + p_2$ för två samverkande partiklar. Med hjälp av detta skulle man kunna avgöra hur det förhöll sig med obestämdheten. Niels Bohr var snabb med att svara att frågan var felställd. Vad man observerar beror på vilket mätanordning man har, och det resultat man får väljs ut just i mätögonblicket. Hans synsätt kom att kallas Köpenhamnstolkningen. De flesta nöjde sig med detta och problemet fick vila i 20–30 år.

Det EPR-experiment som ursprungligen föreslogs genomfördes aldrig, men på 1950-talet påpekade David Bohm att det skulle vara enklare att göra det med två partiklar som har spinn $S = (\hbar/2)$ och som

Årets pristagare



Alain Aspect

Född 1947 (75 år) i Agen, Frankrike. Fil.dr 1983 vid Université Paris-Sud, Orsay, Frankrike. Professor vid Institut d'Optique Graduate School – Université Paris-Saclay och École Polytechnique, Palaiseau, Frankrike.



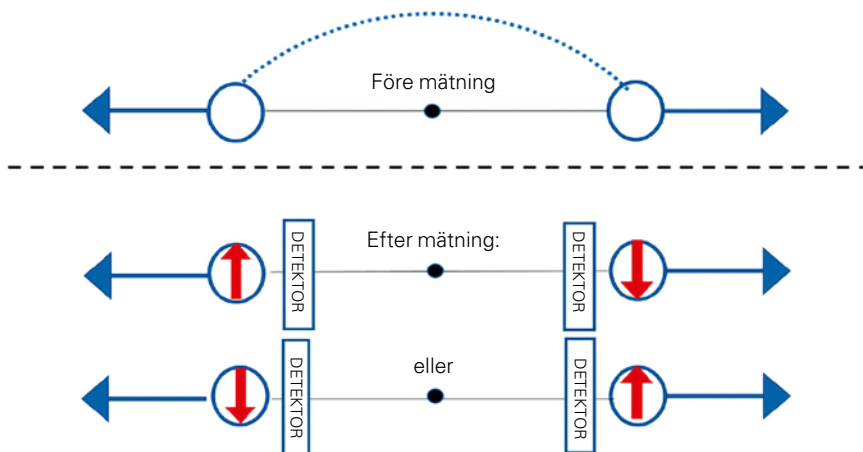
John F. Clauser

Född 1942 (79 år) i Pasadena, CA, USA. Fil.dr 1969 vid Columbia University, New York, USA. Research Physicist, J.F. Clauser & Assoc., Walnut Creek, CA, USA.



Anton Zeilinger

Född 1945 (77 år) i Ried im Innkreis, Österrike. Fil.dr 1971 vid Universität Wien, Österrike. Professor vid Universität Wien, Österrike.



FIGUR 1 Bohms tankeexperiment med sammanflätade spinn ($1/2$)-partiklar. De röda pilarna anger "spinn upp" och "spinn ner".

► utsänds koherent från samma källa i motsatta riktningar (figur 1).

Om man kan ordna det så att man vet att summan av de två spinnen är $S_1 + S_2 = 0$ från början, så förväntar man sig att om man mäter komponenterna $M_s = +(\frac{1}{2})\hbar$ (spinn upp) eller $-(\frac{1}{2})\hbar$ (spinn ner) kommer de alltid ut med motsatt spinnriktning både i den klassiska fysiken (på grund av rörelsemängdsmomentets bevarande) och i kvantmekaniken (eftersom $M_{s1} + M_{s2} = 0$). Skillnaden är att enligt kvantmekaniken är fotonparen före mätningen en odelbar enhet med en gemensam vågfunktion, som måste skrivas som $\Psi(1, 2) = (1/\sqrt{2})[\psi_1(1)\psi_2(2) \pm \psi_1(2)\psi_2(1)]$. Den kan alltså inte uttryckas som produkten av de två enskilda fotonerna, ψ_1 och ψ_2 . Fotonerna är *sammanflätade* (eng. *entangled*). I detta tillstånd är både M_{s1} och M_{s2} obestämda före mätningen, men en mätning reducerar tillståndet till antingen $\psi_1(1)\psi_2(2)$ eller $\psi_1(2)\psi_2(1)$. Värdet av M_{s1} bestämmer då omedelbart värdet av M_{s2} och detta oberoende av hur långt bort partiklarna har kommit ifrån varandra, en avståndsverkan som av många upplevdes som främmande och mystisk och som Einstein kallade "spöklik".

Kunde det verkligen förhålla sig så, eller var det så att utfallet i mätningarna styrdes av någon *dold variabel* som kvantmekaniken hade missat? Redan 1927 hade de Broglie föreslagit att en underliggande

pilotvåg styr vad som händer i varje ögonblick och David Bohm själv vidareutvecklade på 1950-talet en liknande teori med en pilotvåg bestämd av en hypotetisk kvantmekanisk potential $U(r)$. En sådan styrning skulle kunna rädda Einsteins, Podolskis och Rosens förhoppning om en deterministisk och vid varje tidpunkt väl definierad värld, men åsikterna gick starkt isär – och det var inte bara fysiker som var intresserade. Det hela rubbade även filosofernas syn på vad som verkligen existerar.

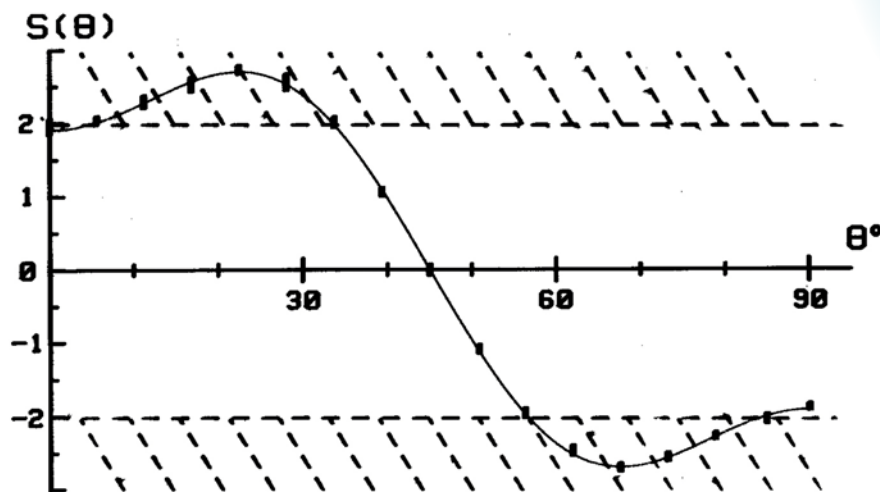
NÄR JOHN CLAUSER ÅR 1968 ville ägna sig åt experiment för att försöka reda ut

vad det var som var gällde, varnades han av flera i sin omgivning för att ge sig in i detta åsikternas getingbo (många höll på kvantmekanikens förutsägelser trots att det saknades direkta bevis). Han framhärskade och planerade försök vid Columbia University, New York, innan han kom till UCL Berkeley som postdoc 1970. Där utförde han tillsammans med doktoranden S.J. Freedman det första tydligt utslagsgivande EPR-experimentet.

Det Bohmska experimentet med två spinn $1/2$ -partiklar som nämndes nyss räcker inte för att bevisa eller motbevisa de dolda variabelernas existens, men år 1964 hade John Bell i ett fundamentalt arbete formulerat ett villkor (den så kallade Bell-olikheten), som måste gälla för *alla slag* av dolda-variabel-teorier. Bells olikhet gäller om:

- A) mätvärdena existerar för alla partiklar, oberoende om de mäts eller ej (de tänks då vara bestämda av *dolda variabler*) och
- B) om valet av mättriiktning för den ena partikeln inte påverkar mätresultatet för den andra, som är långt avlägsen (kallat *lokalitets-villkoret*).

Clauser insåg att om han kunde ordna ett experiment där det visade sig att Bells olikhet *inte* är uppfylld så skulle det vara ett bevis på att kvantmekanikens beskrivning av verkligheten är den rätta. Sådana



FIGUR 2 Sannolikhet vid olika vinkelskillnader θ mellan polarisatorerna. Data för vissa θ -områden faller klart utanför $S = 2$.

experiment kan göras med två koherent utsända fotoner (två fotoner som utsänds i kaskad från samma atom, till exempel $J_i = 0 \rightarrow J = 1 \rightarrow J_f = 0$ i Ca-atomen), vilkas polarisation mäts. Men det räcker inte med att mäta strålningskvanta som utsänds i 180 eller 90 grader i förhållande till varandra (vilket skulle ge samma resultat även inom dolda-variabel teorin), man måste också se hur det ser ut vid till exempel 22,5 och 67,5 grader. Detta utredde Clauser först teoretiskt tillsammans med medarbetarna Horne, Shimony och Holt, som formulerade den så kallade CHSH-olikheten, ett specialfall av Bell-olikheten.

I praktiken innebär CHSH-olikheten att om man mäter sannolikheterna S för samtidig detektion av fotoner med de två polarisationsvinklarna inställda med skillnaderna (0, 22,5), (0, 67,5), (45, 22,5) och (45, 67,5) grader, så kan dolda-variabelteorin gälla endast om summan

$$S(0, 22,5) + S(0, 67,5) + S(45, 22,5) - S(45, 67,5) \leq 2$$

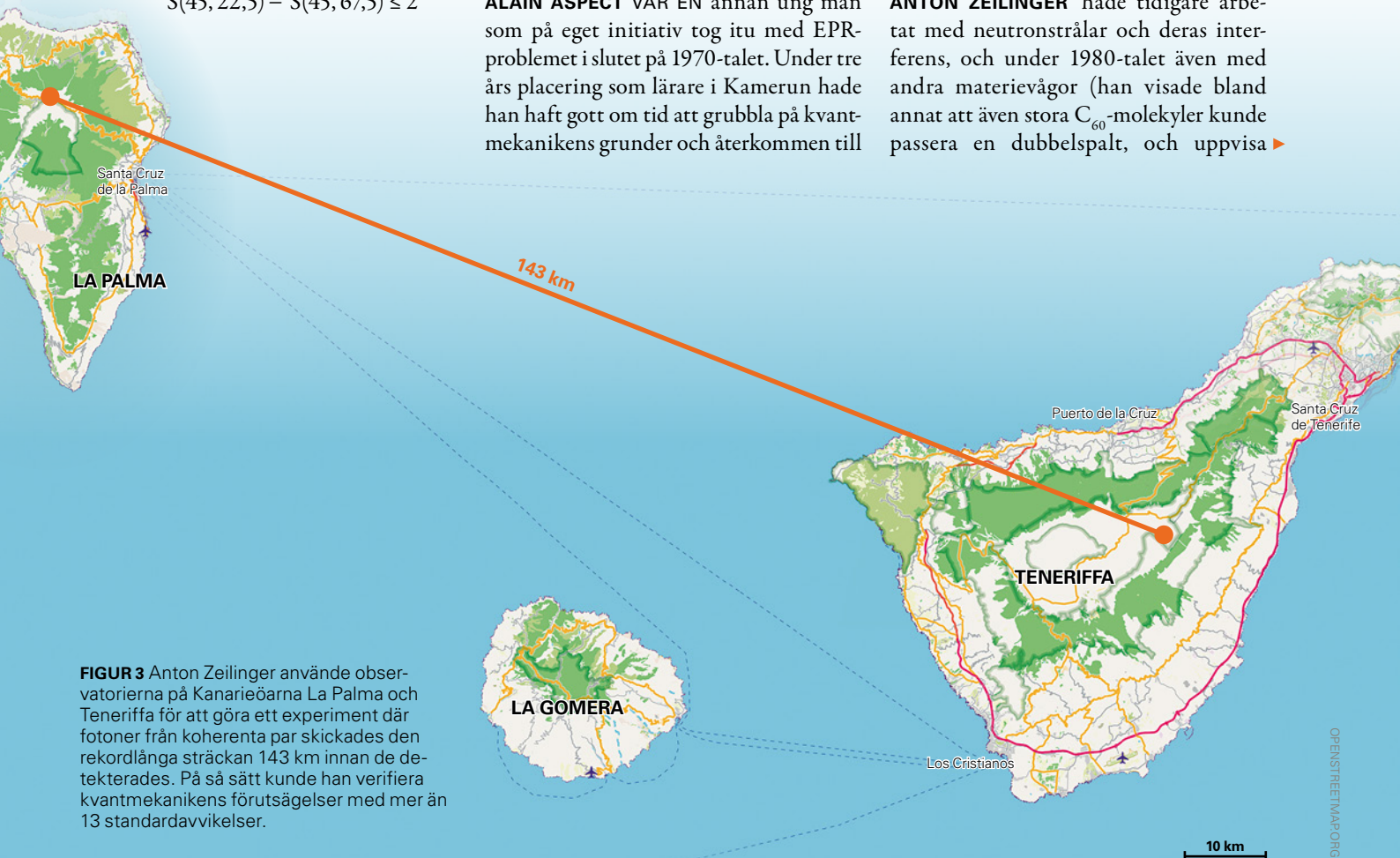
medan kvantmekaniken förutsäger att summan av S -termerna är $= 2,5$. I Freedmans och Clausers experiment överskreds tydligt värdet $S = 2$. Detta var den första indikationen på att vi lever i en värld utan *lokal realism*, det vill säga att vi har inte bestämda lokala värden för den ena eller den andra partikelns egenskaper innan de mäts.

Clausers experiment mottogs med intresse inom den begränsade krets som diskuterade fundamentala aspekter av fysiken, men kritiserades också för ofullständighet. Kanske fanns det luckor i resonemanget som ändå kunde rädda den lokala realismen. Hur var det med avståndet mellan detektorerna, var det tillräckligt långt för att inte någon sorts signal skulle kunna ge information från den första detektorn till den andra om dess resultat? Och hur var detektionssannolikheten, kunde man inte ha missat något i vissa vinklar?

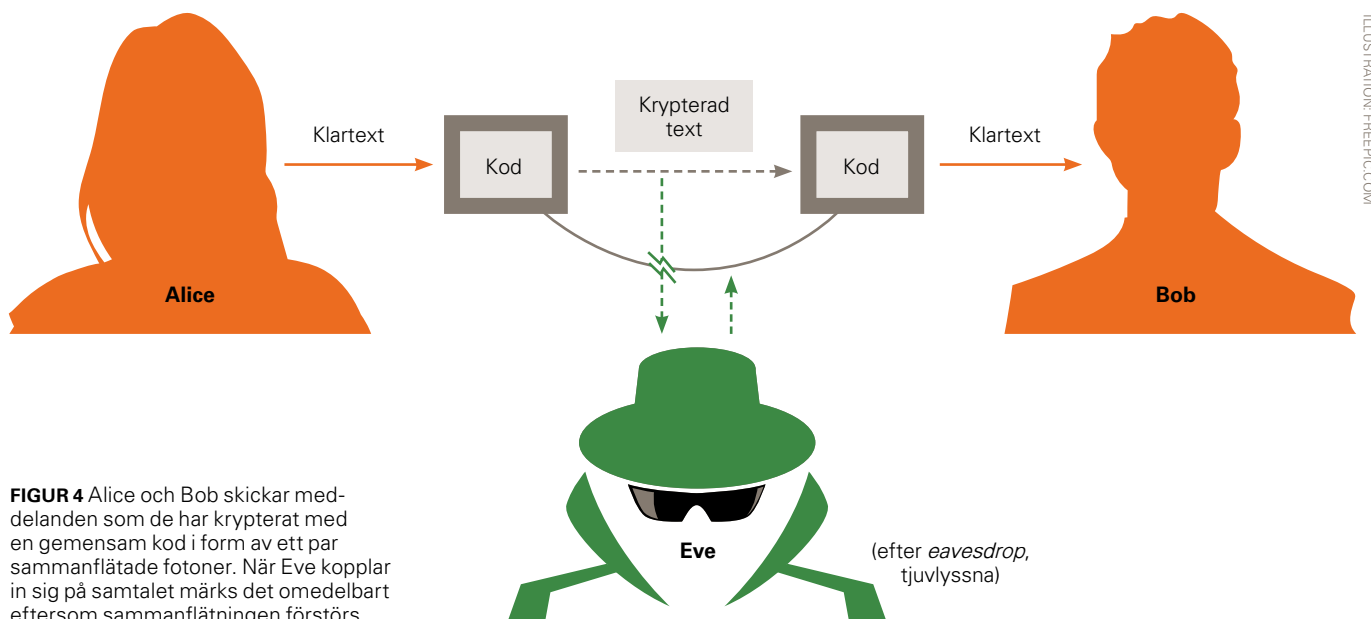
ALAIN ASPECT VAR EN annan ung man som på eget initiativ tog itu med EPR-problemet i slutet på 1970-talet. Under tre års placering som lärare i Kamerun hade han haft gott om tid att grubbla på kvantmekanikens grunder och återkommen till

Paris satte han upp en serie experiment som publicerades 1981–82 och ingick i hans doktorsavhandling. Den allmänna mättekniken hade då förbättrats så att han (tillsammans med Philippe Grangier och Gérard Roger) kunde använda laserexcitation av J_i -tillståndet i Ca och därmed utsträcka avståndet mellan detektorerna till 12 m. Hans viktigaste insats var att täppa till luckan när det gällde kommunikation mellan detektorerna. Han ordnade så att polarisationen hos båda fotonerna vreds en viss vinkel under tiden mellan deras utsändningar (ca 5 ns), så snabbt att ingen okänd signal med ljusets hastighet skulle hinna med att förmedla någon information. Denna vridning utfördes slumpmässigt för att undvika systematiska fel. Slutresultatet, som publicerades 1982, var klart till förmån för kvantmekanikens bild och det fick ett stort genomslag inte bara bland specialister, utan inom hela fysiksamhället (figur 2).

ANTON ZEILINGER hade tidigare arbetat med neutronstrålar och deras interferens, och under 1980-talet även med andra materievågor (han visade bland annat att även stora C_{60} -molekyler kunde passera en dubbelspalt, och uppvisa ►



FIGUR 3 Anton Zeilinger använde observatorierna på Kanarieöarna La Palma och Teneriffa för att göra ett experiment där fotoner från koherenta par skickades den rekordlånga sträckan 143 km innan de detekterades. På så sätt kunde han verifiera kvantmekanikens förutsägelser med mer än 13 standardavvikelse.



FIGUR 4 Alice och Bob skickar meddelanden som de har krypterat med en gemensam kod i form av ett par sammanflätade fotoner. När Eve kopplar in sig på samtalet märks det omedelbart eftersom sammanflätningen förstörs.

► interferensmönster, precis som fotoner), men i slutet av 80-talet övergick han till optiken. Där förfinade han EPR-experimenten genom att låta fotoner från koherenta par, skapade genom så kallad nedkonvertering av en foton med dubbla frekvensen, löpa i optiska kablar eller i fria luften över allt längre sträckor innan de detekterades. Detta kulminerade i ett experiment där den ena fotonen skickades mellan observatorierna på öarna La Palma och Teneriffa, en sträcka på 143 km. Även på detta avstånd visade sig fotonerna vara sammanflätade och de mätte S-summan till $2,508 \pm 0,037$. Därmed verifierade de kvantmekanikens förutsägelse med mer än 13 standardavvikelser (figur 3, föregående uppslag).

EFTER CLAUSERS, Aspects och Zeilingers experiment med fotonpar insåg man att det var möjligt att utnyttja kvantmekanikens inneboende möjligheter på helt nya sätt. Meddelanden skulle kunna krypteras helt säkert och nya typer av logiska kretsar byggas upp. Sambandet mellan samtidiga observationer på två avlägsna punkter medger visserligen inte att man kan överföra information snabbare än ljuset, men man kan förse avsändare och mottagare med en gemensam kod i form av ett sammanflätat fotonpar. En främmande tjuvlyssnares intrång (mät-

ning) märks då omedelbart eftersom det förstör sammanflätningen. Och logiska kretsar kan arbeta med *qubitar* (quantum bits), vilka har en ytterligare frihetsgrad utöver den rent binära – den kvantmekaniska fasen ϕ i superpositionen mellan de olika partikeltillstånden (figur 4).

Zeilingers var en av de första som utnyttjade dessa nya resurser. Han och hans medarbetare roade sig bland annat med att överföra en bild av den lilla kalkstensfiguren Venus från Willendorf i ett kvantkrypterat meddelande, och de visade också att man kunde *teleportera* en viss egenskap (ett polarisationstillstånd) från en kommunikationskanal till en annan. Det senare utförs med hjälp av de fyra så kallade Bell-tillstånden, som är maximalt sammanflätade kombinationer av två qubitar. Zeilinger utsträckte också formalismen till tre-partikeltillstånd (tillsammans med Greenberger och Horne) och gjorde experiment med sådana. I flera experimentella arbeten visade han sedan hur manipulation av Bell-tillstånd ger helt nya möjligheter inom informationsbehandling, något som starkt bidrog till dagens ansträngningar att bygga kvantdatorer.

SEDAN 1990-TALET HAR kvantinformatiken växt ut till ett stort arbetsområde inom fysiken. Kvantkryptering erbjuds nu av kommersiella företag för använd-

ning inom bankvärlden, i ett kinesiskt forskningsprogram har man överfört information från jorden till en satellit med avsikten att bygga upp ett världstäckande, oknäckbart informationssystem och tävlingen om att bygga den första kvantdatorn som kan överträffa de konventionella pågår för fullt. Det är intressant att notera denna utveckling inte initierades av specialister inom informationsteorin. Nobelpristagaren Richard Feynmann som sagt att "there is plenty of room at the bottom" förutsåg visserligen 1982 möjligheten av en kvantdator som skulle kunna underlätta beräkningar av molekyler och liknande, men hade ingen vision om hur detta skulle kunna utföras i praktiken. Det var först sedan experiment rörande kvantmekanikens fundament visat vägen som kvantinformatiken växte fram.

ERIK B KARLSSON

Professor emeritus i fysik vid Institutionen för fysik och astronomi, Uppsala universitet

Läs mer

Jan-Åke Larsson, "En värld utan lokal realism", *Kosmos* 2017, sid. 28

Erik B Karlsson, "Mätproblemet", *Kosmos* 2017, sid. 98

Bell, J. S. (2004). *Speakable and unspeakable in quantum mechanics : collected papers on quantum philosophy*, Cambridge University Press (med förord av Aspect)



WALLENBERGS FYSIKPRIS 2023

KVALIFICERINGSTÄVLING

26 januari på din skola

Tävlingen sker individuellt, men priser delas också ut till bästa skollag. Varje skolas tre bästa deltagare utgör skolans lag. Priser:

1:a pris $3 \times 3\,000$ kr	4:e pris $3 \times 1\,500$ kr
2:a pris $3 \times 2\,500$ kr	5:e – 10:e pris $3 \times 1\,000$ kr
3:e pris $3 \times 2\,000$ kr	

Anmäl dig till din fysiklärare!

Läs mer om tävlingen på
[www.fysikersamfundet.se/
wallenbergs-fysikpris](http://www.fysikersamfundet.se/wallenbergs-fysikpris)

FYSIKVECKA, FINALTÄVLING & EuPhO

De 18 bästa i kvalificeringstävlingen får komma till en fysikvecka med föreläsningar, studiebesök och del av experimentell final 13–17 mars 2023 på Chalmers och Göteborgs universitet.

Som en del av finaltävlingen deltar finalisterna också i Nordic-Baltic Physics Olympiad i Tallinn 13–16 april 2023.

De fem bästa i kvalificeringstävlingen erbjuds delta i Europeiska fysikolympiaden (EuPhO) som arrangeras i Hannover 16–20 juni.

Arrangör: Svenska Fysikersamfundet

Sponsor: Stiftelsen Marcus och Amalia Wallenbergs Minnesfond

INTERNATIONELLA FYSIKOLYMPIADEN

10–17 juli 2023 i Tokyo, Japan

De fem bästa i finaltävlingen får göra en oförglömlig resa och representera Sverige vid den internationella fysikolympiaden.

Nästan 400 ungdomar från ungefär åttio länder tävlar i fysik under två dagar. Resten av veckan är fylld med utflykter, föredrag och möten med fysikintresserade från hela världen.

Kanske blir det du som får åka!



Hur går det med Marsresorna, egentligen?

Det var en världsnyhet när de amerikanska astronauterna Neil Armstrong och Buzz Aldrin landade på månen den 20 juli 1969. Ytterligare månlandningar skapade förväntningar på att mänskligheten var i början av **ett bredare utforskande av vårt solsystem** och att nästa steg skulle bli att besöka Mars.

Semestrar i rymden verkade på den tiden vara en möjlighet, och för ett fåtal utvalda har det också blivit turistresor upp till omloppsbana. Men verkligheten är att vi inte har besökt en annan himlakropp sedan 1972. Rymden är fortfarande en utmanande gräns för mänskliga resor.

Lokal rymdmiljö

Fédération aérospatiale internationale definierar gränsen till rymden vid 100 km höjd. Lite fler än 600 personer har rest utanför den gränsen. Omkring 90% av dem var män. De flesta av dessa rymdresor inträffade i omloppsbanan kring jorden, vid en höjd av cirka 400 km, och pågick upp till 6 månader.

Det finns ett litet antal män som har varit i rymden under längre perioder. Den längsta flygningen genomfördes av Valeri Polyakov, som var på den ryska rymdstationen Mir under 437 dagar. Apolloastronauterna reste till månen på 3 dagar i farkoster för 3 personer. NASA har ett nytt program, Artemis, för att återvända till månen och etablera en månbas. Men att resa längre än så innebär komplicerade utmaningar.

Mars

Medeldistansen mellan jorden och Mars är 225 miljoner km. Mars tar nästan dubbelt så lång tid på sig att åka runt solen som jorden, detta leder till ett startfönster för resor var 26:e månad. Den kortaste tur-och-returresan till Mars skulle ta cirka



FOTO: NASA

Månen nästa? Den svensk-amerikanska astronauten Jessica Meir är medlem i NASA:s Artemis-team, som arbetar med att förbereda för uppdraget som bland annat ska skicka den första kvinnan till månen.

500 dagar, med 30 dagar på Mars yta. Det behövs mycket utrymme för förnödenheter för den långa resan vilket begränsar antalet besättningsmedlemmar. En möjlig besättning kan ha fyra medlemmar, två som stannar i omloppsbana kring Mars och två som landar på Mars.

Mars yta är idag en fientlig miljö för människor. Planeten har en tunn atmosfär dominerad av koldioxid. Atmosfärstrycket är mindre än 1% av det på jorden, vilket gör att vatten inte kan existera i flytande form på ytan.

Livsuppehållande system

För att överleva måste rymdresenärer ha med sig ett livsuppehållande system. De grundläggande mänskliga behoven är en

andningsbar atmosfär, vatten, mat och ett avfallshanteringssystem.

Hittills har man inte lyckats ta fram ett helt slutet system, men man har lyckats med återvinning av till exempel syre och vatten. Fördelen med återvinning är att man minskar lastens massa och volym, och därmed kostnaderna för uppskjutningen av rymdfarkosten.

Det är troligt att man vid resor till både månen och Mars kommer att skicka en eller flera fraktfarkoster i förväg och sedan återförsörja med ytterligare farkoster.

Fysiologi i rymden

Rymdresor är påfrestande för människokroppen. I omloppsbana kring jorden upplever astronauter viktlöshet som leder till förändringar, till exempel omfördelning av vätskor i kroppen, muskler behöver inte jobba lika mycket som på jorden och blir därför mindre och svagare, ben i kroppen förlorar kalcium och blir skörare. För att försöka motverka dessa förändringar behöver astronauter träna flera timmar per dag.

Nivån av fysisk försämring är relaterad till uppdragets varaktighet. Eftersom resan till Mars är lång kommer astronauterna att lida av rymddeconditionering när de kommer fram. Det betyder att deras kondition försämras, i synnerhet med avseende på de fysiologiska systemen som är känsliga för mekanisk belastning.

På Mars är gravitationskraften 0,38g, lite mer än en tredjedel av gravitationskraften på jorden. Astronauter som landar

måste kunna anpassa sig till den ökade gravitationskraften efter den långa resan i mikrogravitation, och hur det kommer att fungera är osäkert. Det har bland annat föreslagits att man skulle kunna ta med en kortarmad centrifug på längre resor i solsystemet för att simulera gravitation i rymdfarkosten och på så sätt motverka rymddeconditioneringen.

Strålning

På jorden är vi dagligen utsatta för strålning från rymden, men på en mycket låg nivå (se "Vår strålningsmiljö", *Fysikaktuellt*, nr 1/2022). Vi får skydd från både vår atmosfär och jordens magnetfält. Astronauter i omloppsbana får en högre stråldos, men har fortfarande en del skydd.

När astronauter reser bort från jordens skydd blir de utsatta för ännu högre stråldoser. På interplanetära resor ger kärnor med hög laddning och energi det huvudsakliga bidraget till stråldosen. Vi vet ännu inte tillräckligt mycket om hur stora mängder sådan strålning människor kan tåla. Partiklarna kan skada celler eller DNA i kroppen. Det finns risker för sjukdomar, både under resan och att strålningen leder till cancersjukdomar senare i livet.

Vår kunskap om strålningens effekter på människor bygger till stor del på studier av människor utsatta för höga strålningsdoser på jorden, till exempel efter de atombomberna i Hiroshima och Nagasaki. Strålningen i rymden har andra egenskaper.

Baserat på mätningar som genomfördes av NASA:s farkost Mars Science Laboratory på väg från jorden till Mars kan man uppskatta att stråldosen på den korta 500-dagars resan till Mars skulle utsätta astronauterna för en total dos av kring 0,9 Sv. Det är i närheten av den karriärgräns som för närvarande tillämpas av många nationer för astronauter i omloppsbana kring jorden. Det kan jämföras med vår årliga effektiva stråldos i Sverige som är kring 2–3 mSv när man tar hänsyn till alla källor.

Att begränsa astronauters stråldos kommer att bli den stora utmaningen på en Marsresa. Det mest effektiva skyddet



ILLUSTRATION: NASA/PL

En affisch som föreställer en framtid när människan redan har utforskat Mars, och turistresor till "historiska minnesmärken", som Mars-rovern Perseverance, är allmänt tillgängliga.

mot rymdstrålning är för närvarande avskärmning, som beror på hur rymdfarkosten konstrueras. Bra kost och läkemedel kan hjälpa att hålla astronauterna friska och man kan försöka välja astronauter som är mindre känsliga för strålningen.

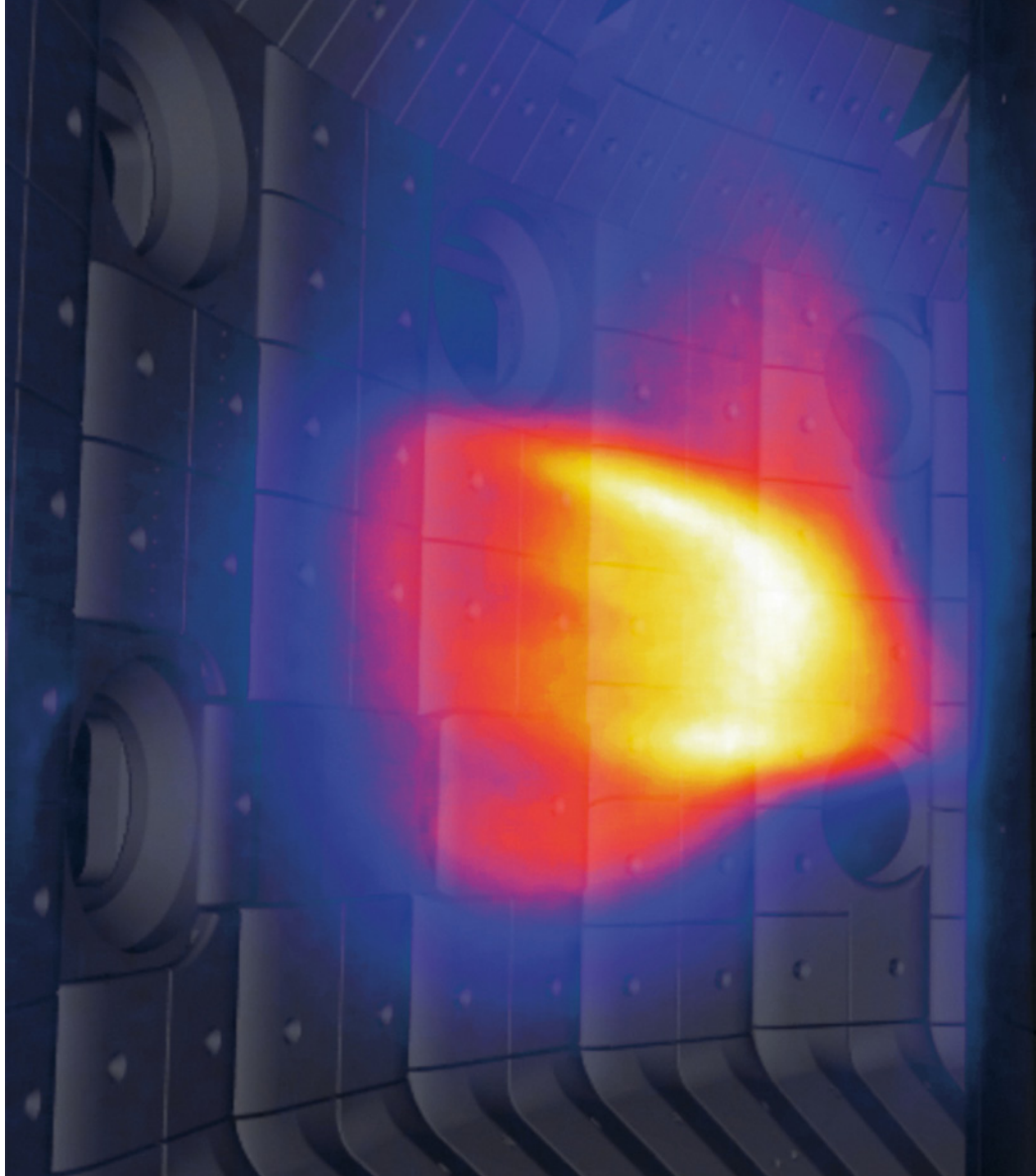
Framtiden

Det är möjligt att vi kommer att få se människor på månen igen inom en inte alltför avlägsen framtid. När det gäller

Mars kommer dock ingen regering att skicka astronauter om det finns en betydlig risk för deras liv och hälsa. Därför är det många detaljer som måste kontrolleras innan vi får se det första mänskliga steget på Mars yta – om inte en privat aktör tar risken och i de tidiga upptäcktsresandenas anda bara åker!

CAROL NORBERG

Docent i rymdfysik, Umeå universitet

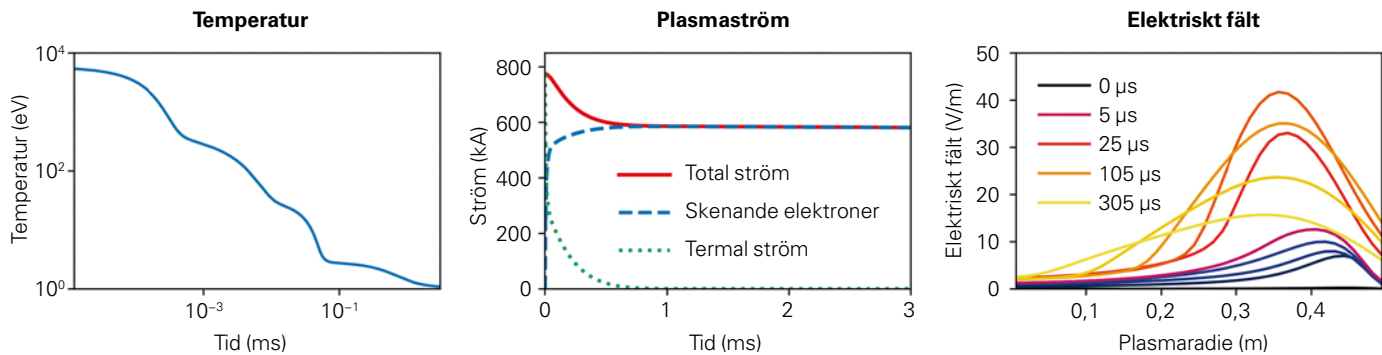


FIGUR 1 Skenande elektroner i tokamak-magnetfält tenderar att ge upphov till spektakulära ljusfenomen. Här visas ett sådant fångat i den schweiziska tokamaken TCV.

AVHANDLINGEN

Elektroner som skenar och skiner

Efter snart 70 år av dedikerad forskning börjar flera trovärdiga fusionsreaktorkoncept nu presenteras. Ett antal stora problem återstår dock att lösa innan en fungerande reaktor kan byggas. Ett av dessa är de så kallade skenande elektroner som ibland uppstår. I sin doktorsavhandling presenterar **Mathias Hoppe** nya metoder för att förstå elektronernas födelse och liv.



FIGUR 2 Illustration över de viktigaste parametrarna från en simulering av en så kallad disruption i en tokamak. Disruptionen inleds med att temperaturen snabbt minskar (notera den logaritmiska x-skalan). Inom fusion mäts temperaturen normalt i energi-enheter (elektronvolt), där en elektronvolt motsvarar ungefär 11 600 K. Temperaturminskningen åtföljs av en överföring av plasmaström till de skenande elektronerna. Accelerationen av de skenande elektronerna drivs av det elektriska fältet, vars rumsliga variation är av stor betydelse för hela händelseförloppet.

Ända sedan kärnfysikens födelse i början av 1900-talet har forskare drömt om att kunna utvinna de enorma mängder energi som frigörs när två lätta atomer slås samman och genomgår fusion. Sedan forskningsprogram inom området påbörjades på 50-talet har gradvisa men över tid stora framsteg gjorts, nu senast hösten 2021 då det europeiska fusionsexperimentet JET i Storbritannien lyckades generera mer energi än något tidigare experiment (se *Fysikaktuellt* 2/2022). De senaste åren har intresset bland privata finansiärer dessutom ökat explosionsartat, kanske tydligast demonstrerat av det amerikanska företaget Commonwealth Fusion Systems som med starkt stöd från Massachusetts Institute of Technology (MIT) lyckades säkra 1,8 miljarder dollar i privat finansiering i slutet av 2021 för att konstruera sin testreaktor SPARC.

Med andra ord ser nu målet om att konstruera en fungerande fusionreaktor som kan producera enorma mängder fossilfri energi ut att vara närmare än någonsin tidigare. Ett antal stora frågor återstår dock att besvara innan en fungerande reaktor kan byggas, och den kanske största av dessa rör de extremt snabba elektroner som av forskarna kallas *skenande elektroner* (figur 1).

SKENANDE ELEKTRONER är ett av många spektakulära fenomen som förekommer i plasmor. Eftersom plasmat utgörs av fria laddade partiklar som känner av

Runaway electron model development and validation in tokamaks

- Författare: Mathias Hoppe
- Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 2021
- ISBN: 978-91-7905-598-1
- Länk till avhandlingen: research.chalmers.se/publication/527630
- Handledare: Tünde Fülöp, professor, Chalmers, Physics, Subatomic, High Energy and Plasma Physics.
- Opponent: Dr. Philipp Lauber, Max-Planck Institute for Plasma Physics, Garching, Tyskland.



varandras elektriska laddningar på långa avstånd så är kollisioner mellan partiklar i ett plasma ”mjuka” och gradvisa, till skillnad från kollisioner mellan atomer i en gas eller mellan biljardbollar som sker genom korta stötar. Detta innebär att den effektiva friktionskraft som en elektron upplever i ett plasma avtar ju snabbare elektronen rör sig – en snabb elektron har helt enkelt mindre tid på sig att ändra sin rörelsemängd när den rör sig genom de elektriska fält som skapas av dess grannar.

Om en tillräckligt stark elektrisk kraft appliceras så att en snabb elektron känner en positiv nettoacceleration kommer elektronen därmed bli ännu snabbare, vilket gör att den upplevda friktionskraften

minskar och att elektronens nettoacceleration ökar ytterligare. Resultatet blir en klassisk så kallad skeningsprocess som gör att elektronerna skenar iväg mot ljusets hastighet utan något som kan stoppa dem.

PRECIS DEN SORTS STARKA elektriska fält som krävs för att skenande elektroner ska uppstå förekommer då och då i den hittills mest framgångsrika typ av fusionsmaskin som kallas *tokamak* (en konstruktion för att innesluta ett plasma med ett toroidalt, skruvat magnetfält, se *Fysikaktuellt* 2/2022 för en längre förklaring). Ibland uppstår nämligen instabiliteter i det plasma som maskinen innesluter, vilket kan leda till att plasmat snabbt kyls ner och tappar sin goda elektriska ledningsförmåga i ett förlopp som kallas för *disruption* (figur 2). Den starka ström, ofta på flera hundra tusen eller miljoner ampere, som flyter genom plasmat avtar då snabbt och inducerar ett starkt elektriskt fält enligt Faradays induktionslag. Ur ett energiperspektiv innebär det att energi som tidigare använts för att driva strömmen genom plasmat och uppehålla det magnetfält som håller det fast helt plötsligt överförs till en liten grupp extremt snabba elektroner. När det utdöende plasmat förr eller senare slår i väggen finns det därför en högenergetisk elektronstråle som är redo att orsaka koncentrerad och allvarlig skada på tokamakens väggkomponenter.

I min doktorsavhandling har jag utvecklat simuleringskoden DREAM ►

► (*Disruption Runaway Electron Analysis Model*) som beräknar hur många skenande elektroner som accelereras i en tokamak-disruption, samtidigt som storheter som plasmats temperatur, jonsammansställning och det elektriska fältet som induceras utvecklas, med hänsyn tagen till att de skenande elektroner som accelereras bidrar med både en viss elektrisk ström (som reducerar det inducerade elektriska fältet), en viss uppvärmning och jonisering av atomer som befinner sig i plasmat. Koden för samman en mängd olika fysikaliska modeller, men löser i grunden Ampères och Faradays ekvationer tillsammans med den så kallade Fokker–Planck-ekvationen. Den senare beskriver statistiskt var elektronerna i plasmat befinner sig samt hur snabbt och i vilken riktning de rör sig, medan de två förra beskriver det makroskopiska elektriska fält som induceras på grund av elektronernas rörelse (som ju ger upphov till en elektrisk ström).

Eftersom de skenande elektronerna snabbt tar över i princip hela strömmen som flyter genom plasmat i en disruption kommer ändringar i hur de skenande elektronerna rör sig påverka hur starkt det inducerade elektriska fältet är, vilket gör just kombinationen av de tre ovan nämnda ekvationerna centrala för beräkningen.

ETT AV DE KLURIGASTE problemen att lösa i utvecklingen av DREAM var relaterat till den unika geometri som en tokamak utgör. Utöver den toroidala formen så är magnetfältet – som elektronerna tvingas följa – skruvat som en polkagris och blir starkare på insidan av maskinen. Detta leder till att det finns två huvudsakliga typer av partikelbanor i en tokamak: vissa partiklar kommer reflekteras när magnetfältstyrkan de känner ökar och studsar därmed fram och tillbaka i magnetfältet, medan andra kan röra sig obehindrat i samma riktning runt tokamaken hela tiden. De två distinkta typerna av banor gör att Fokker–Planck-ekvationen ser olika ut i olika delar av fasrummet, och ger upphov till (integrerbara) singulariteter i de punkter som utgör gränsen mellan de båda typerna av banor. Programmeringsmässigt stäl-

Statistisk fysik + Maxwells ekvationer = Plasmafysik

Modeller av tokamak-plasmar använder ofta (eller härleds från) den så kallade Fokker–Planck-ekvationen, med Maxwells ekvationer som tvångsvillkor.

Fokker–Planck-ekvationen i DREAM tar formen

$$\frac{\partial f}{\partial t} - eE \cdot \frac{\partial f}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial p} \cdot \left[-Af + D \frac{\partial f}{\partial p} \right]$$

där $f=f(x,p)$ betecknar elektronernas fördelningsfunktion, det vill säga sannolikheten att en elektron i punkten x har rörelsemängd p , e är elementarladdningen, E ett elektriskt fält, och vektorn A och matrisen D beskriver effekten av kollisioner mellan elektronerna.

Det elektriska fältet bestäms genom att kombinera Ampères och Faradays lagar, vilket leder till induktionsekvationen

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \frac{\partial j}{\partial t}$$

där μ_0 är vakuumperrmittiviteten och strömtätheten j fås från hastighetsmomentet av f :

$$j(x) = \int v f dp$$

”Ändringar i hur de skenande elektronerna rör sig kommer påverka hur starkt det inducerade elektriska fältet är.”

ler detta till med en hel del problem som kräver att man håller tungan rätt i mun, då det ger upphov till flera specialfall som måste hanteras.

Målet med DREAM är att vägleda utvecklingen av de system som är tänkta att hindra, eller åtminstone lindra, effekterna av disruptioner i framtida tokamaker. Men för att kunna göra det med någon sorts trovärdighet gäller det först att visa att beräkningarna stämmer i dagens tokamaker. Det är vanligtvis väldigt svårt att göra mätningar på snabba elektroner i ett plasma men en kraftfull metod, som bygger på det faktum att skenande elektroner i ett magnetfält strålar ut så kallat synkrotronljus, beskrivs i den sista delen av min doktorsavhandling genom koden SOFT (*Synchrotron-detecting Orbit Following Toolkit*).

På grund av att elektronerna rör sig vid relativistiska hastigheter så strålas ljuset ut i respektive elektrons rörelseriktning, vilket gör att det bara går att observera ljuset från elektronerna när de rör sig rakt mot observatören. I en tokamak sker detta i allmänhet på en uppsättning punkter i rummet som utgör en avgränsad yta och som beror på exakt i vilken riktning gentemot magnetfältet elektronerna rör sig. Resultatet blir spektakulära ”ljusfläckar” som kan ta en mängd olika former och vars exakta utseende antyder detaljer om elektronernas rörelse.

NÄSTA STEG I MIN forskning blir nu att faktiskt testa modellerna mot dagens experiment, något jag fokuserar på under min postdoc i Schweiz. När vi sedan är säkra på att modellerna är korrekta kommer de kunna användas i designen av nästa generations tokamaker, så att vi efter decennier av forskning äntligen kan tämja den mytomspunna fusionsreaktionen.

MATHIAS HOPPE

Swiss Plasma Center, EPFL, Schweiz

Mer om skenande elektroner

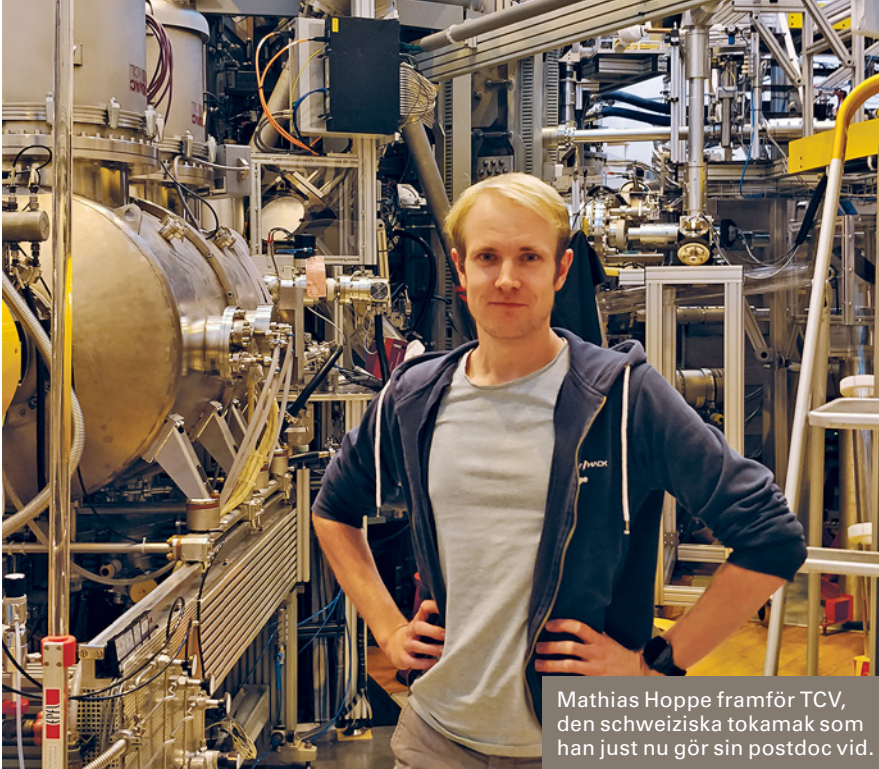
Mathias pratar om skenande elektroner: youtu.be/p5EFXO10Nf0

DREAM-koden på GitHub:

github.com/chalmersplasmatheory/DREAM

SOFT-koden på GitHub:

github.com/hoppe93/SOFT2



Mathias Hoppe framför TCV, den schweiziska tokamak som han just nu gör sin postdoc vid.

Mathias Hoppe

Uppväxt: Vårgårda, några mil norr om Göteborg.

Bor nu: I Morges, Schweiz, en småstad 1 mil från Lausanne och 5 mil från Genève.

Fritidsintressen: Löpning, styrketräning och musik. När man bor i Schweiz blir det också en hel del vandring i bergen.

"Bland det närmsta vi kommer magi i vardagen"

Ett kandidatprojekt blev en anställning som amanuens, som utvecklade sig till en doktorantjänst. Nu gör **Mathias Hoppe** en postdoc på ett labb för fusionsforskning i Schweiz.

Vad arbetar du med just nu?

För tillfället gör jag en postdoc på Swiss Plasma Center vid EPFL (*École polytechnique fédérale de Lausanne*) i Lausanne, Schweiz. Labbet är ett av de större för fusionsforskning i Europa och har en egen tokamak kallad *Tokamak à Configuration Variable* (TCV). Min uppgift här är att utveckla modeller för och simulera vad som händer i TCV-plasmat när skenande elektroner uppstår. Inom fusionsplasmafysik finns dock en mängd olika intressanta frågor att studera, och jag försöker samtidigt hjälpa till med att förstå hur man bäst startar TCV samt hur små mängder material från en tokamaks vägg – så kallade "orenheter" – påverkar plasmat's egenskaper.

Vad fick dig att börja jobba med fusionsplasmafysik?

Det började med att jag hittade ett

spännande kandidatprojekt som handlade om att simulera partikelbanor i en fusionsmaskin. Efter projektet blev jag tillfrågad om jag hade lust att vidareutveckla projektet anställd som amanuens, vilket så småningom ledde till en mastersavhandling och senare en doktorsavhandling inom ämnet. Det som fick mig att fastna för just plasmafysik var dels den starka kopplingen till elektromagnetisk fältteori som utgör grunden för hela fältet och som alltid fascinerat mig – kanske eftersom elektricitet och magnetism är bland det närmsta vi kommer magi i vardagen – och dels det faktum att mycket av forskningen kring plasmafysik idag drivs genom sofistikerade datorberäkningar, vilket intresserat mig även långt innan jag började på universitetet.

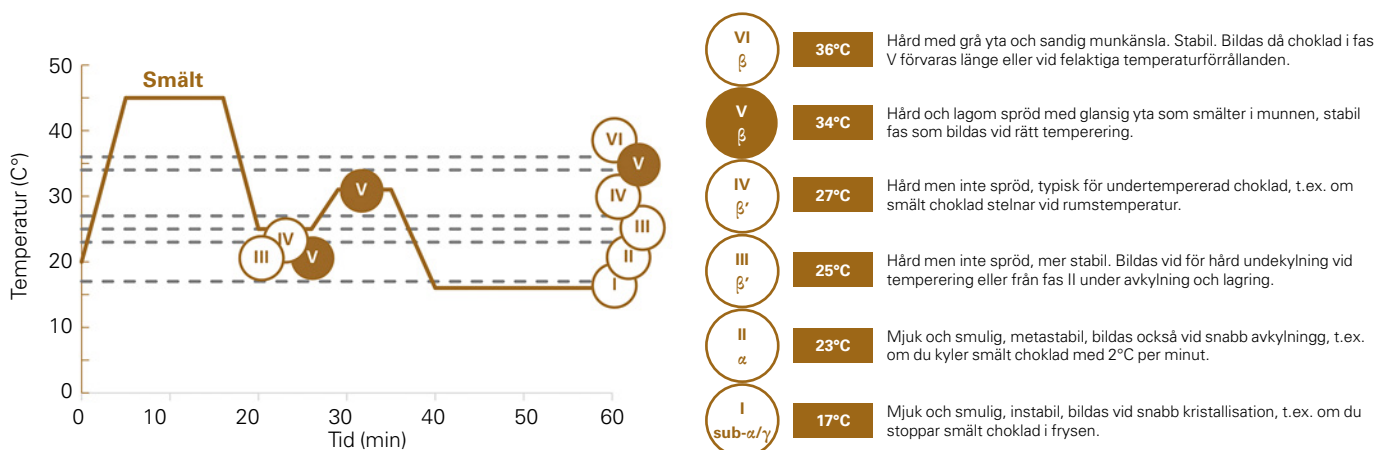
Vad blir nästa steg för dig?

Jag siktar på att utnyttja återstoden av min tvååriga postdoc på Swiss Plasma Center till fullo för att lära mig ännu mer om fusion och plasmafysik, knyta nya kontakter, och förhoppningsvis bidra med ny kunskap om hur disruptioner kan mildras i framtida reaktorer. Att vara så här nära ett faktiskt fusionsexperiment

är enormt lärorikt, dels eftersom det ger en bättre överblick över hur ett fusionsplasma skapas och uppehålls, och dels eftersom det ger mig som teoretiker en bättre förståelse för vad som krävs för att en fysikalisk modell för ett fusionsplasma ska vara realistisk. Vad som händer efter min postdoc är än så länge oklart – kanske blir det ytterligare en postdoc någonstans i Europa – men det hade varit väldigt kul att så småningom återvända till Sverige för att bidra till att förbereda oss på att ta vara på fusion när den väl blir tillgänglig, liksom att utbilda den generation fysiker som kommer krävas för att fullt ut ta vara på tekniken.

Vad gör du när du inte jobbar med fysik?

Jag brukar vanligtvis träna (löpning och gym) och spela gitarr. Jag spelar för tillfället i två band som vi startat sedan jag kom till Schweiz. Det ena bandet är såpass nytt att vi inte har någon tydlig inriktning än (men sannolikt kommer det bli musik med jazz-, funk- och prog-influenser), medan det andra är ett metal-band med likasinnade som bland annat har influenser från Göteborgsk dödsmetall.



Choklad tempereras för att få ett slutresultat som bara består av fas V.

Chokoladens sex faser.

GOD FYSIK

Mikrovågor och choklad

Vi är nog många som skriver under på att en bit **choklad** eller två förgyller livet. Men chokladen är inte bara god, den har också en spännande struktur – och så kan man använda den för att göra roliga experiment i sin mikrovågsugn.

En härlig chokladpralin med en blank och hård yta är ett gott julgods och ett kul pyssel att göra inför jul, för vem uppskattar inte att få en ask handgjorda praliner?

Choklad har inte bara en härlig och komplex smak utan också en spännande, komplex struktur med sex olika faser. För att få den bästa upplevelsen när vi mumsar på vår pralin, både gällande smak och munkänsla, måste vi hålla ordning på alla dessa faser. Genom att värma och kyla chokladen på rätt sätt – vilket kallas att *temperera* den – får vi till rätt fasövergångar. Vi kommer dessutom visa er hur man, när man ändå är igång och smälter choklad, kan mäta frekvensen på vågorna i en mikrovågsugn.

DEN SOM NÅGON GÅNG låtit choklad ligga lite för länge i skåpet har kanske sett att ytan blivit gråaktig. Även om det inte ser så aptitligt ut är det inte farligt, och

det är absolut inte mögel som man kanske skulle kunna tro. Däremot kan det ge en lite grynig känsla i munnen. Den gråaktiga chokladen har inte heller det distinkta knäckande ljudet när den bryts, eller den efterlängtna känslan när fett i chokladen smälter i munhålan ca 36°C – trots att den nyss var fast och inte påverkades av fingrarnas 33°C. De fascinerande egenskaperna hos chokladen ligger i kakaosmörets förmåga att kristallisera i olika faser. Det polymorfa kakaosmöret kan omvandlas mellan sex olika kristallfaser (möjligen fem, viss oenighet råder om indelningen av den medelstabla β' -formen, fas III–IV). Detta utnyttjas i tillverkningsprocessen och när vi hemma tempererar choklad för att bilda den β -form med unika smälteegenskaper som ger den speciella konsistens vi har lärt oss att älska.

Stabilitet och smältpunkt varierar mellan de olika faserna och vid tillverkning eller temperering smälter man först

chokladmassan. Vid 45°C har chokladens alla fasta faser smält, varpå man kylar ner den till 25–28°C. Detta kallas för att man *underkylar* massan, och syftet är att bilda kristallkärnor innan strukturen tillåts växa vidare. En sekundär uppvärmning till ca 31°C får mindre stabila kristallformer att smälta och rätt struktur (fas V) att växa, innan massan slutligen kontrollerat kyls ned efter att ha gjutits till chokladkakor eller praliner. Om tempereringen lyckas kommer pralinerna dessutom att enkelt lossna från formen. Densiteten på choklad vid fas V är nämligen högre än övriga faser (möjligen inte fas IV, men den bildas inte från smält choklad). Den kristallina packningen är alltså både tät och välstrukturerad. En optimal lagringstemperatur är sedan 14–18°C.

TERMODYNAMIKENS LAGAR gör att chokladen förr eller senare kommer att övergå till den mest stabila fasen och

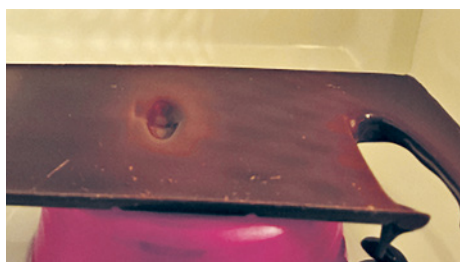
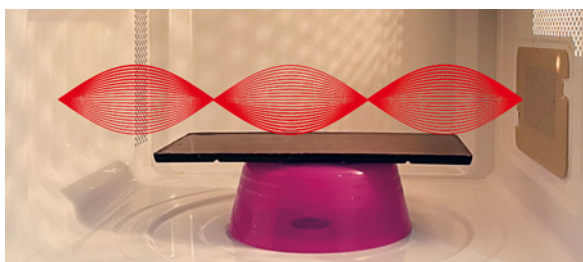


FOTO: JOHAN MAURITSSON

Med en chokladkaka och ett måttband är det enkelt att räkna ut mikrovågornas frekvens.

chokladen blir då tyvärr både grå och porös. Fenomenet kallas fettblom och det är nålformade kristaller och ljusets brytning som får chokladen att se grå ut. Hur fort det går beror på flera faktorer, men processen påskyndas exempelvis av temperaturvariationer eller förekomst av flytande fett. Julens fyllda chokladpraliner löper därför en större risk, då det flytande fettet inne i pralinen migrerar mot ytan och driver på kakaosmörets omvandling till den mindre aptitliga formen. Om pralinerna dessutom flyttas fram och tillbaka mellan julens gottabord och svalare förvaring gör man bäst i att avnjuta dem innan julen är över.

Men den som låtit chokladen ligga lite för länge kan alltid trösta sig med att grynigheten är reversibel, även om det är lättare gjort för en chokladkaka än för en pralin.

ETT ENKELT SÄTT att smälta choklad är i mikrovågsugn och här kan vi passa på att göra ett kul fysikexperiment för att mäta mikrovågornas frekvens. När två motriktade vågor med samma frekvens möts interfererar de och skapar en stående våg. Att det kallas "stående våg" beror på att summan av de två vågorna inte ser ut att förflyttas. På vissa ställen blir summan hela tiden noll, en så kallad nod, och mellan noderna maximeras i stället amplituden, så kallade bukar. Vi kan skapa stående vågor med två motriktade högtalare eller genom att ersätta den ena högtalaren med en vägg som reflekterar tillbaka vågorna.

I en mikrovågsugn skapas mikrovågorna av en magnetron som är placerad i ena sidan av ugnen. Vågorna som skickas ut reflekteras av väggarna och ett mönster av stående vågor bildas. För att maten

som är placerad i ugnen ska värmas jämnt och inte brännas i vissa punkter brukar det finnas en roterande platta i botten av ugnen (det finns även ugnar där magnetronens sändare roterar istället). Nu vill vi se var bukarna i de stående mikrovågorna finns och plockar därför bort den roterande plattan. Som detektor använder vi en tunn chokladkaka, upphöjd med hjälp av en plastmugg. Vår chokladkaka kommer att börja smälta vid bukar, där mikrovågorna svänger som mest. Man får vara ganska observant när man startar mikrovågsugnen och snabbt stänga av den när man ser att chokladen börjar smälta. Om smältpölarna blir för stora påverkas ju mätnoggrannheten. Eftersom vi vet att avståndet mellan två bukar är en halv våglängd, kan vi mäta hur långt det är mellan smältpölarna i vår chokladkaka och sedan enkelt räkna ut mikrovågornas våglängd och frekvens.

När vi har smält all vår



FOTO: PIXABAY

choklad funderar vi kanske på om det inte finns ett enklare sätt att tempera chokladen än att styra snäva temperaturintervall, och det finns det.

EFTERSOM KRISTALLKÄRNOR främst bildas på partiklar eller redan bildade kristallkärnor, så kallade groddar eller kärnor, kan vi använda en liten del fast choklad och blanda i den smälta chokladen när vi låtit den svalna till ca 31°C. Det räcker med att tillsätta 1–2% finhackad choklad för att få en bra och väldefinierad tillväxt, och det går faktiskt till och med att använda den dåliga fas VI-fasen, vi kommer ändå att få fin fas V-choklad, eftersom fas VI inte bildas direkt från smält choklad. Sen är det bara att låta chokladen svalna, lagra den rätt och njuta vidare.

JOHAN MAURITSSON OCH
MALIN SJÖÖ
Lunds universitet

Lite översikt

Chokladen vi äter innehåller fler ingredienser än rent kakaosmör, det finns bland annat kakaopartiklar, socker, ofta lecitin och ibland mjölk. Det gör att smälttemperaturerna för chokladens olika faser

påverkas. Exempel nedan ges för mörk choklad, mjölkchoklad och vit choklad. Kakaomassa innehåller både kakaopartiklar och kakaosmör.

	Mörk choklad	Mjölkchoklad	Vit choklad
Smälttemperatur	45–50°C	40–45°C	40°C
Kärnbildning	28–29°C	24–28°C	24–25°C
Temperering	31–32°C	30–31°C	27–28°C
Kakaomassa	34–70%	10%	0%
Kakaosmör	0–20%	20–25%	25–30%
Socker	30–60%	40–50%	30–50%
Tormjölk	0%	15–25%	25–30%

VAR MED OCH SÖK SVAREN FÖR EN SÄKRARE VÄRLD

FOI växer
och vi behöver
rekrytera många
nya medarbetare,
bland annat
fysiker.

Har du goda
grundkunskaper i fysik?

Gillar du problemlösning
och har förmågan att hitta
de centrala delarna i en
problemställning?

Kan du
paketera lösningen
på ett bra sätt?

Läs mer
foi.se/jobb



FOTO: E. MUYBRIDGE

FIGUR 1 Travande häst, ruta 2 av 20, E. Muybridge (1887). Fotot visar att alla hästens fyra ben lämnar marken när den travar.

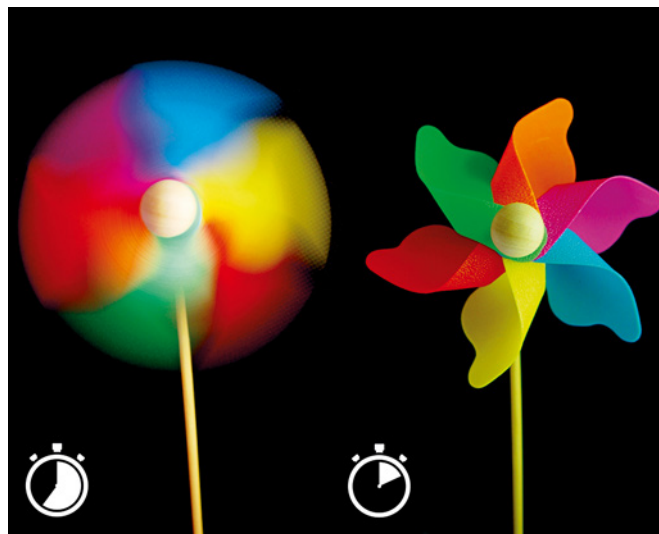


FOTO: MIKERUN/WIKIMEDIACOMMONS

FIGUR 2 Foto av en vindsnurra med (vänster) lång exponeringstid, vilket ger en suddig bild, och (höger) kort exponeringstid som "fryser" rörelsen och ger en skarp bild.

Konsten att fotografera elektroner

Det började i slutet av 1800-talet med en travande häst. Sedan dess har **ultrasnabb fotografering** utvecklats till att kunna fånga valenselektroners rörelser på film.

Ar 1872 gav industrimannen Leland Stanford, som också ägde flera tävlingshästar, fotografen Eadweard Muybridge i uppdrag att avbilda en häst i rörelse. Detta för att kasta ljus över ett gammalt mysterium. De flesta dåtida konstnärer målade travande hästar med minst en fot i marken vid varje tillfälle, men Stanford var övertygad om att detta inte var korrekt. Eftersom en häst som travar i full fart rör benen för snabbt för att ögat ska kunna urskilja detaljerna ville Stanford ha ett fotografi som fångade processen.

Några år senare lyckades Muybridge utveckla en teknik för att ta en serie bilder som visade rörelsen (figur 1). Genom detta gav han inte bara stöd åt Stanfords åsikter om springande hästar, utan lade

också grunden för ultrasnabb fotografering.

DEN GRUNDLÄGGANDE IDÉN i ultrasnabb fotografering är att "frysa" den snabba rörelsen genom att minska tidsperioden när fotot tas, det vill säga den tid då kameran sensor eller film blir belyst, tillräckligt mycket för att det fotograferade objektet i praktiken inte hinner röra på sig.

Figur 2 illustrerar principen med en vindsnurra fotograferad med lång respektive kort belysningstid. Belysning under längre tid, som på den vänstra bilden, resulterar i en suddig bild, eftersom vindsnurran hinner rotera en signifikant sträcka under tidsintervallet. Den högra bilden visar en skarp bild av samma vindsnurra. Här har rörelsen frusits – man har

begränsat tidsintervallet så mycket att objektets rörelse under exponeringstiden är mycket mindre än dess storlek.

Muybridge förverkligade ultrasnabb fotografering genom att använda väldigt snabba mekaniska slutare till sina kameror. Hans slutare hade ungefär 1 millisekunds ($1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$) öppningstid, vilket då var toppmodernt. Varje kamera och slutare kopplades till ett snöre som spändes över hästens bana, och på så sätt utlöstes slutarna automatisk när hästen passerade och rev ner snöret. Slutare är en enkel lösning för att begränsa hur länge filmen belyses, men de har en nedre gräns på några $100 \mu\text{s}$ ($1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$) för mekaniska slutare och några $10 \mu\text{s}$ för elektroniska slutare. För att undersöka snabbare rörelseförlopp, vilket man typiskt vill i vetenskapliga eller ►

► industriella tillämpningar, behövs en metod för att belysa objektet under kortare tid. Detta kan man göra genom att använda sig av en kort artificiell blix. Till exempel ett stroboskop kan ge ljuspulser som är kortare än 10 μ s.

Ett antal processer som rör sig i de här hastigheterna har filmats, bland annat explosioner eller en kulas färd genom ett spelkort, en ljuslåga eller ett äpple (Harold E. Edgerton, 1964–74).

EN ANNAN LJUSKÄLLA med korta blixter fick senare utbredd användning: pulslaser. Laser kan generera pulser i ns till fs-intervallet (1 ns = 10^{-9} s, 1 ps = 10^{-12} s, 1 fs = 10^{-15} s). Utvecklingen av ultrakorta laserpulser och tekniker som CPA (*chirped pulse amplification*, Nobelpriset i fysik 2018) har spelat en fundamental roll för ultrasnabb fotografering. Ett brett spektrum av nya fenomen har kunnat undersökas med laser, som till exempel formförändringar av makromolekyler (på en skala från ns och uppåt), molekylation (ps till ns) eller molekyllära vibrationer (fs till ps), se figur 3.

Förutom synliga ljuspulser har

elektronklasar med kort livslängd tillämpats för ultrasnabb fotografering, genom att använda tidsupplöst elektronmikroskopi och elektrondiffraction. Ahmed Zewail (Nobelpriset i kemi 1999) utvecklade och använde dessa tekniker för att filma kemiska reaktioner på ps till fs-tidsskalen.

ETT PROBLEM NÄR DET gäller ultrasnabb fotografering är att de processer vi vill filma är så snabba att även om vi har tillgång till en tillräckligt kort blix för att "frysa" rörelsen och fånga den på film, så vet vi inte när processen börjar och kan därför inte fotografera den. Det är samma problematik som när man försöker ta ett foto av en blix vid ett åskväder: eftersom du inte vet när blixten slår ner så vet du inte när du ska trycka på knappen, och missar bilden.

Lösningen på det här problemet är vanligen en så kallad triggerpuls som utlöser processen. Det kan handla om att till exempel excitera en molekyl eller jonisera en elektron. Efter en kontrollerad fördröjning avfyras en andra blix (eller motsvarande) som fångar förloppet på film.

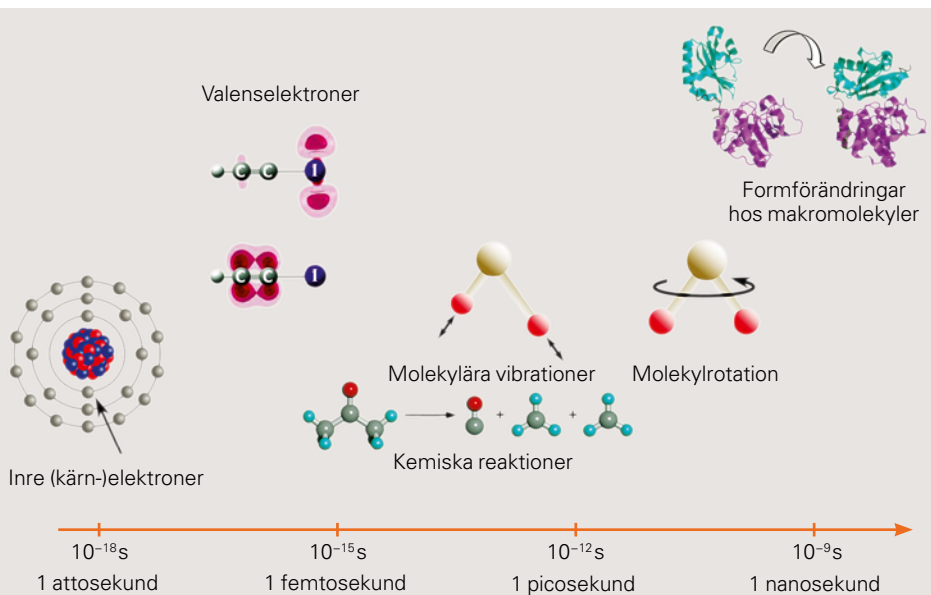
Triggerpulsen har alltså samma roll som snörena i Muybridges fotografiska process – de som utlöste slutaren när hästen rev ner snöret.

De mest avancerade "blixterna" nu-förtiden har emellertid ännu kortare pulser än de tidigare nämnda, med varaktighet ner mot 100 attosekunder (1 as = 10^{-18} s) eller mindre. Det är inte möjligt att generera så korta ljuspulser i det synliga och nära-infraröda spektrat. Anledningen är att en enda svängning av ljuset, vilket motsvarar den kortaste möjliga längden på en ljuspuls, är 1,5–3 fs för 450–900 nm (vilket är en typisk våglängd för laser). Därför används elektromagnetisk strålning med mycket kortare våglängder, vanligen i intervallet 1–100 nm, vilket ligger i de extrema ultravioletta (XUV) och mjukröntgen-spektralområdet.

Dessa så kallade sekundära källor genereras på ett mer komplicerat sätt: genom att fokusera pulser från en femtosekund-laser (som alltså är en primärkälla i den här kontexten) in i en gas, eller mot en fast yta, kan man starta en extrem, icke-linjär växelverkan som producerar XUV- eller röntgen-pulser som är en hundradel av den ursprungliga laser-pulsen (figur 4).

DESSA ATTOSEKUND-PULSER är tillräckligt korta för att man ska kunna filma valenselektroners rörelser, till exempel i en molekyl som precis har joniserats av en kort triggerpuls (Kraus m.fl. 2015, figur 5). Hela omorganiseringen av elektronhållens fördelning i jodacetylen, från ena änden av molekylen till den andra, tar mindre än 1 fs, vilket gör en tidsupplösning på 100 as nödvändig för att kunna filma förloppet.

Ett annat fascinerande område som kan studeras med attosekund-filmning är tidsfördröjningen av joniseringen vid den fotoelektriska effekten, det vill säga den tid som passerar mellan att en foton absorberas och joniserar en atom, och att motsvarande elektron utsänds. Fotojonisering antogs länge vara ögonblicklig, men attosekund-experiment har visat en liten fördröjning, beroende på atomen eller molekylen samt det



FIGUR 3 Tidsskalor för ultrasnabba processer, så som formförändringar av makromolekyler, rotation och vibration hos molekyler, kemiska reaktioner och samspel mellan valens- och kärnelektroner (bilder tagna från P.M. Kraus m.fl., *Science* 350, 790–795 (2015); Ahmed H. Zewail, *J. Phys. Chem. A* 104, 24, 5660–5694 (2000); Shamsuddin, R m.fl. (2013). "Computational prediction of hinge axes in proteins", *Computational Advances in Bio and Medical Sciences* (ICABS), 15 Suppl 8. 1-2 (2013)).

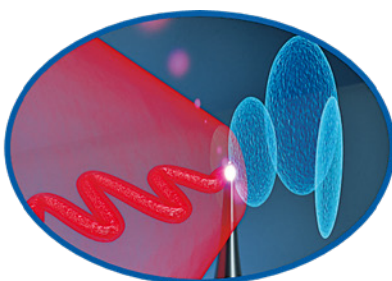


FIGUR 4 (A) Den stora utmaningen för ultrasnabb fotografering med en tidsupplösning på attosekund-nivå är inte kameran, utan att generera attosekund-korta blixтар (här illustrerat med en vanlig kamera med blyxt). En anordning för att generera attosekund-pulser är i själva verket flera meter lång.

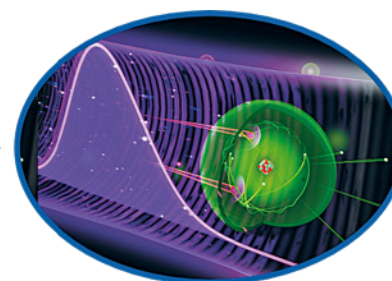
(B) Huvudstegen för att förverkliga attosekund-fotografering är: använd en femtosekund-laser (primärkälla), beskjut en gas eller yta och generera på så sätt attosekund-pulser (sekundärkälla), använd dessa korta pulser för att filma diverse experiment.



Primärkälla
Femtosekundlaser
5–20 fs



Sekundärkälla
Extremt ultraviolett ljus
50–100 as



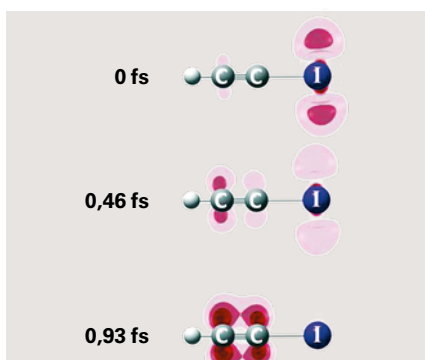
Experimentet filmas
Rörelser hos valenselektroner, tidsförskjutningar vid jonisering med mera

ursprungliga tillstånd som elektronen tas från eller den generella potential elektronerna rör sig i.

DEN GRUNDLÄGGANDE IDÉN – att belysa något under en mycket kort tidsperiod för att filma en snabb process – är samma som när Muybridge utförde den första ultrasnabba fotograferingen. Men teknologin för att utföra denna snabba belysning har förändrats i grund och botten, från en tidsskala på millisekunder till attosekunder, det vill säga med mer än 13 magnituder ($>10^{13}$)!

På motsvarande sätt har mängden processer som kan undersökas genom att ”frysa” rörelsen ökat markant, från djurs rörelse via kulors flykt, formförändringar hos makromolekyler och rörelser hos molekyler eller atomer, till elektroners förflyttningar i materia.

Framtiden för ultrasnabb fotografering



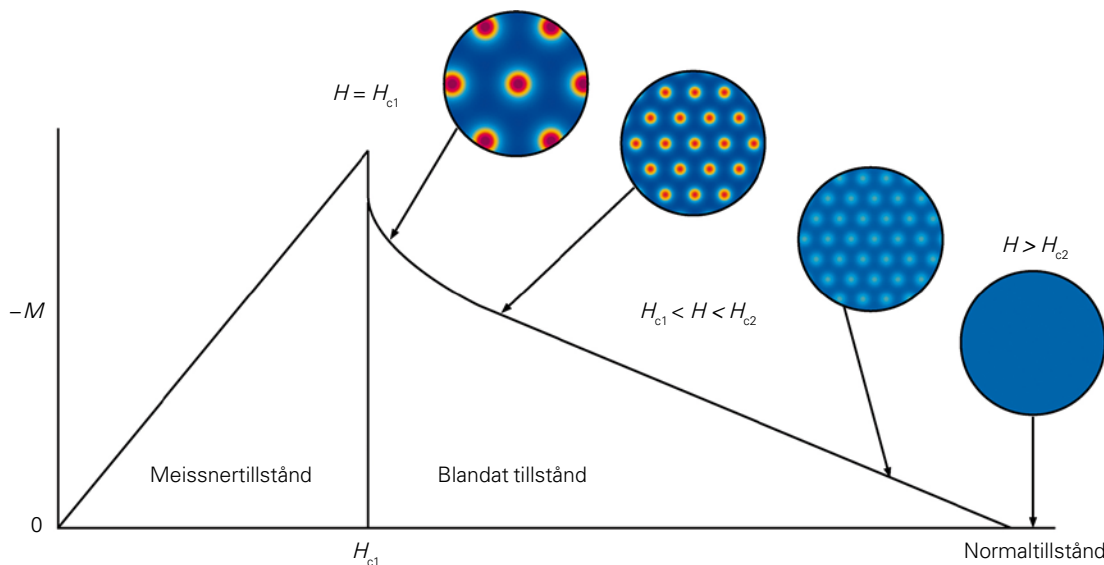
FIGUR 5 Kraus med flera undersökte 2015 elektronrörelser i jodacetylen (HCCI) efter jonisering (en elektron tas bort) vid tiden 0. Fördelningen av elektronhål visas i rött. Under mindre än 1 fs rör de sig till andra änden av molekylen. För att filma denna process behövs en tidsupplösning på 100 attosekunder. (P.M. Kraus m.fl., *Science* 350, 790–795 (2015)).

gällande ännu kortare förlopp innefattar förstås mindre och mindre objekt, som rörelsen hos inre elektroner (kärnelektroner) i atomer och molekyler. Sådana inre elektroner har en starkare och närmre bindning till atomkärnan än de valenselektroner som redan har kunnat studeras.

Till och med processer inuti atomkärnor, förknippade med beståndsdelarnas (protoners och neutroners) rörelser, kommer kanske kunna filmas. Viktiga processer som fission, eller till och med fusion, skulle då kunna studeras och optimeras för praktiska tillämpningar.

LÁSZLÓ VEISZ OCH FRITZ SCHNUR
RElativistic Attosecond physics Laboratory
(REAL) och Institutionen för fysik,
Umeå universitet

Översättning: Christina Kjellstrand



FIGUR 1 CeCu_2Si_2 uppvisar en ovanlig ökning i formfaktorn för flödeslinjerna nära gränsen för den supraledande fasen.

Supraledning vid starka magnetfält

Vid Fysikdagarna i Lund i somras hölls en tävling för bästa presentation under den allmänna postersessionen. Vinnare blev **Emma Campillo**, Lunds universitet, med sin forskning om supraledare.

Supraledning upptäcktes för mer än hundra år sedan, men det finns fortfarande många obesvarade frågor kring fenomenet. Medan konventionella supraledare förklaras av *BCS-teorin* (som Bardeen, Cooper och Schrieffer fick Nobelpriset för 1972), så finns det ett stort antal "okonventionella" supraledare som beter sig annorlunda. Ett exempel är de så kallade tungfermionsupraledarna, som har dragit till sig mycket intresse sedan upptäckten av den första, CeCu_2Si_2 , 1979.

I en supraledare parar laddningsbärarna (vanligen elektroner) ihop sig med motsatta spinn och rörelsemängd till så kallade Cooper-par under en viss kritisk temperatur. Den här processen underlättas av fononer. I ett tungfermion-material beter sig dessa laddningsbärare som om de hade en massa som är mångdubbelt större än en fri elektrons. Det här tvingar ner energinivåerna, vilket gör att

Några termer

Fermi-ytan är den yta som delar lediga från upptagna elektrontillstånd vid absoluta nollpunkten.

Londonmodellen, efter bröderna London (1935), beskriver grundläggande relationer för supraledare gällande dess supraledande ström relativt de elektromagnetiska fälten kring och i den.

Paramagnetism kännetecknas av att den bara finns när ett yttre magnetfält finns. Paramagnetismen är svag och riktad i samma riktning som det yttre fältet.

Zeemaneffekten är en magnetoptisk effekt, där en delning av en spektrallinje uppstår i ett magnetfält.

material med stark inre magnetism, som man annars kunde tro skulle hindra bildandet av Cooper-par. Det här är fallet i tungfermionsupraledare. CeCu_2Si_2 uppvisar till exempel kvantkriticitet (där en kontinuerlig fasövergång inträffar vid den absoluta nollpunkten) som kan drivas av antingen en förändring av det hydrostatiska trycket eller av materialets struktur.

FÖR ATT STUDERA DETTA tittade vi på det gitter av flödeslinjer som utvecklas i CeCu_2Si_2 när det placeras i ett magnetfält. I normalfallet tränger supraledare ut magnetfält, men ett flertal supraledare låter, i likhet med CeCu_2Si_2 , magnetiskt flöde tränga in i materialet i form av små tuber, eller flödeslinjer, där materialet inte är supraledande. Resten av materialet kan då fortsätta vara supraledande även vid starkare magnetfält. Över en viss övre, kritisk

BCS-teorin inte kan tillämpas på den här typen av material.

Tvärt emot vad man skulle kunna anta, så kan supraledning dessutom uppstå i

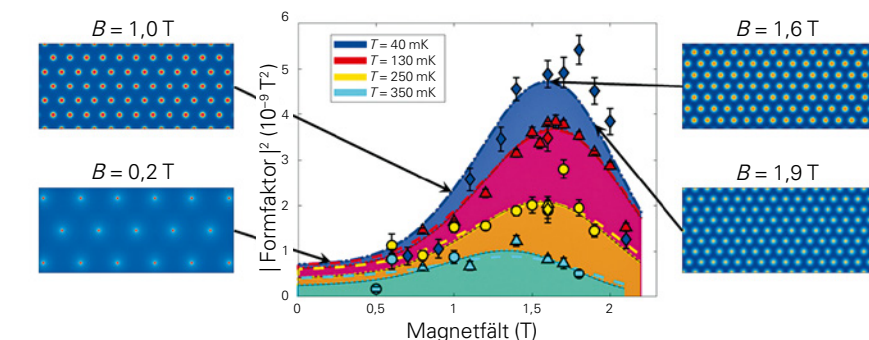
gräns släcks supraledningen ut och materialet återgår till sitt normala tillstånd.

Neutroner har en magnetiskt rörelsemängd, och kan därmed böjas av det periodiskt fördelade magnetfält som flödeslinjernas gitter ger upphov till. Utifrån detta kan vi mäta storleken och fördelningen av flödeslinjerna, vilket i sin tur ger en bild av hur den underliggande supraledningen ser ut. Den viktigaste parametern att mäta är formfaktorn, som visar hur mycket magnetfältet inuti supraledaren varierar, och som kan beräknas utifrån intensiteten hos de uppmätta diffraktionstopparna.

Vanligtvis skulle formfaktorn för gittret av flödeslinjer minska med fältet mot den övre kritiska fältgränsen. När fler flödeslinjer trycks in i supraledaren börjar effekterna överlappa, vilket leder till både minskande magnetisk kontrast och formfaktor. Vid den övre kritiska gränsen för fältet, där flödeslinjernas centrum överlappar helt, närmar sig den magnetiska kontrasten och formfaktorn noll. Det här beteendet kan enkelt beskrivas med de vanliga fenomenologiska modellerna, till exempel Londonmodellen.

Men CeCu_2Si_2 uppvisar en ovanlig ökning i formfaktorn för flödeslinjerna nära gränsen för den supraledande fasen, som visar att supraledningen inte förstörs på samma sätt som i nästan alla andra supraledare (figur 1). Samma beteende har tidigare observerats i en annan Ce-baserad tungfermionsupraledare, CeCoIn_5 , där motsvarande ökning anses bero på effekter orsakade av så kallad "Pauliparamagnetism".

NÄR MAN UTSÄTTER vissa supraledare för ett magnetfält delar Fermi-ytan, på grund av Zeemaneffekten, upp sig i band av elektroner ordnade i spinn upp och spinn ner. Den här uppdelningen av Fermi-ytan, eller koncentrationen av tillstånd, gör att spinn upp och spinn ner börjar bete sig olika, vilket kan bryta upp Cooper-paren. Det leder dessutom till ytterligare en källa till variation i magnetfälten, eftersom en paramagnetisk rörelsemängd utvecklas. Sammantaget gör detta att den övre kritiska gränsen för fältet minskas, jämfört vad man kunde förvänta sig utifrån enbart de överlappande fältlinjerna. Okonventionella supraledare är bra kan-



FIGUR 2 Magnetiseringen inuti flödeslinjernas centrum ökar tydligt. Centrumen överlappar också varandra med ökande fält, utan att helt utsläcka hela systemets magnetfält.

didater för att uppvisa effekter av Pauli paramagnetism vid höga magnetiska fält och låga temperaturer, och tungfermion-material som CeCoIn_5 och CeCu_2Si_2 uppfyller dessa kriterier.

TVÅ JAPANSKA TEORETIKER, Ichioka och Machida, utvecklade en mikroskopisk teori för att simulera detta beteende i CeCoIn_5 , som bygger på Eilenbergers mikroskopiska teori för supraledare. De fann att formfaktorn ökar, och att en del av den ökningen beror på ett ökat paramagnetiskt bidrag inuti flödeslinjerna, vilket leder till avvikelser från den utifrån Londonmodellen förväntade formfaktorn.

Detta stämmer med mätningarna från neutronspredningsexperimenten, men följer inte några av de etablerade fenomenologiska modellerna. Med det som premisser ville vi utveckla ett analytiskt verktyg för att reproducera formfaktorns fält- och temperaturberoende vid starka effekter av Pauliparamagnetism, som kan tillämpas på fler material.

Med den tidigare nämnda studien av mikroskopiska uträkningar som utgångspunkt kunde vi se två huvudsakliga effekter som uppträder med ökande fält och starka Pauliparamagnetismeffekter i materialet:

- Spinn-magnetiseringen utvecklas i flödeslinjernas centrum när fältet ökar.
- Radien på flödeslinjernas centrum växer med fältet.

När det paramagnetiska bidraget tas med kan vi se hur magnetiseringen inuti flödeslinjernas centrum ökar tydligt, och hur centrumen med ökande fält överlappar varandra utan att helt utsläcka hela systemets magnetfält (figur 2).

Vår målsättning är att använda den här modellen till såväl andra Ce-baserade supraledare, som till andra starkt Paulibegränsade supraledare (som till exempel $\text{TmNi}_2\text{B}_2\text{C}$) och högttemperatursupraledare som YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$) och Ca-dopad YBCO.

Hos högttemperatursupraledarna stannar materialen i sitt supraledande tillstånd upp till temperaturer runt 80 K, och det förutsägs att de supraledande egenskaperna finns kvar även vid magnetfält på upp emot 100 T. Detta är fallet med YBCO, där vi använde ett specialkonstruerat instrument med vilket vi kunde mäta upp till 25 T. Eftersom instrumentet använde en multikromatisk neutronstråle behövde vi också utveckla en ny metod för att analysera och mäta gittret av flödeslinjer. Denna metod kommer förhoppningsvis att komma till användning i framtida experiment vid ESS (European Spallation Source) när anläggningen väl tas i bruk.

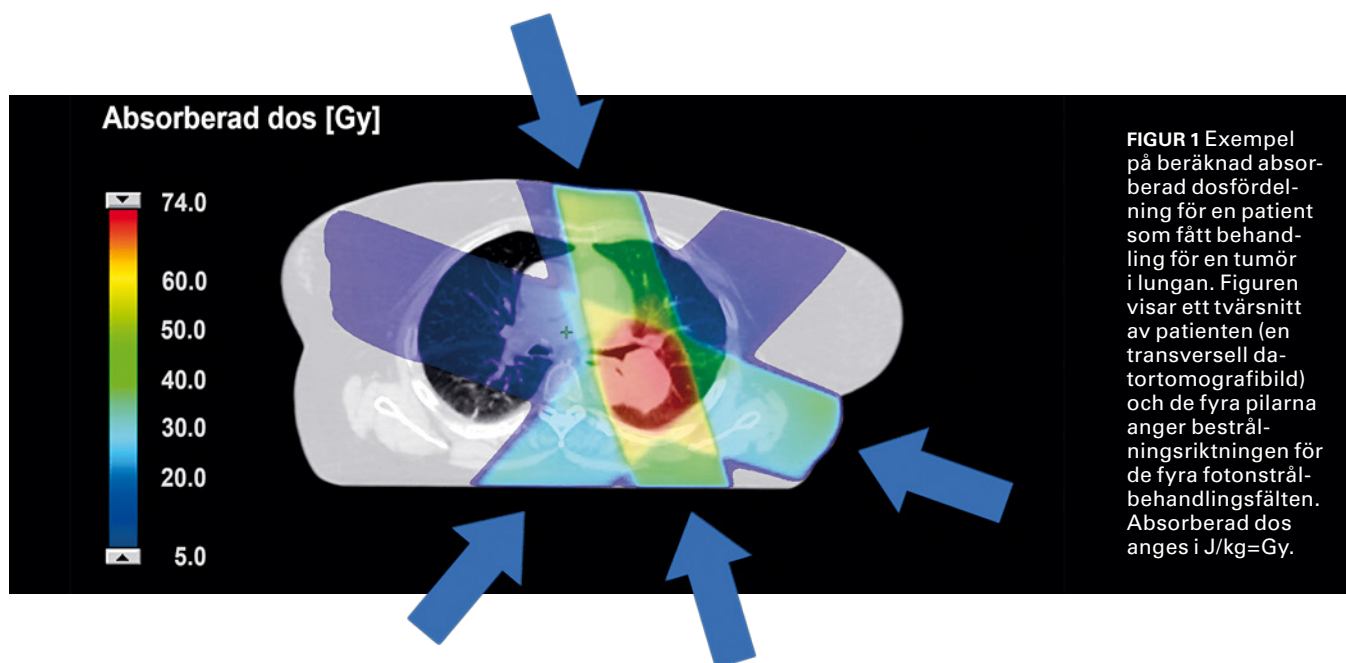
RESULTATEN FRÅN vårt arbete med YBCO och Ca-dopad YBCO visar avvikelser från Londonmodellen vid de högst uppmätta magnetfälten, vilket skulle kunna bero på effekter av Pauli-paramagnetism. Nästa steg är ta data från detta experiment och applicera vår modell på den.

EMMA CAMPILLO

postdoc, Université de Sherbrooke,
Québec, Canada

Översättning: Christina Kjellstrand

Läs mer: "Observations of the effect of strong Pauli paramagnetism on the vortex lattice in superconducting CeCu_2Si_2 ", E. Campillo mfl, Phys. Rev. B 104, 184508 (2021)



FIGUR 1 Exempel på beräknad absorberad dosfördelning för en patient som fått behandling för en tumör i lungan. Figuren visar ett tvärsnitt av patienten (en transversell datortomografibild) och de fyra pilarna anger bestrålningsriktningen för de fyra fotonstrålbehandlingsfälten. Absorberad dos anges i J/kg=Gy.

MEDICINSK FYSIK

Där fysiken möter biologi och medicin

Den allra första strålbehandlingen gavs redan några månader efter att man upptäckt röntgenstrålarna och behandlingsmetoderna har varit under ständig utveckling sedan dess. Inom **modern strålbehandling** optimeras varje patients behandling med utgångspunkt från strålningsfysikaliska, strålningsbiologiska och medicinska kunskaper.

Genom historien har vi människor gång på gång visat prov på att snabbt utnyttja nyvunnen kunskap i syfte att försöka förbättra våra egna levnadsförhållanden. Bara några månader efter att Wilhelm Conrad Röntgen hade upptäckt röntgenstrålarna 1895 så prövade man att använda denna typ av strålar för att bota en bröstcancerpatient. Sedan dess har teknikerna och formerna för strålbehandling varit under ständig utveckling. Cancerfonden redovisar att ungefär hälften av alla cancerpatienter någon gång får strålbehandling.

Strålningsfysik

När en människokropp utsätts för joniserande strålning deponeras energi som

orsakar skador på DNA-molekyler i kroppens celler. Ju mer energi som deponeras i en volym desto mer omfattande blir skadorna. Vid strålbehandling är målet att orsaka så stor skada att cancercellerna förlorar sin livsförmåga och dör.

Med utgångspunkt från fysiken och kunskapen om de fysikaliska processer som äger rum då joniserande strålning reagerar med den materia den färdas i kan man teoretiskt beräkna, och därmed optimera, den absorberade dosfördelningen i patienten vid en strålbehandling (figur 1).

Strålbehandlingsoptimering

Strålbehandling kan ges med olika strålslag, till exempel elektromagnetisk strålning (så kallad fotonstrålning), elektron-

strålning, protonstrålning eller med ännu tyngre partiklar såsom koljoner. Den strålningsbiologiska effekten, det vill säga den skada som orsakas, av en viss absorberad dos varierar för olika typer av strålslag på grund av att jonisationerna sker olika tätt i vävnaden. Tyngre partikelstrålning är mer tätjoniserande och ger större biologisk effekt för samma absorberad dos jämfört med till exempel elektronstrålning eller fotonstrålning.

Vid strålbehandling kommer oundvikligen även friska celler i kroppen att bli bestrålade. Olika typer av celler i människokroppen är olika känsliga för de skador som orsakas och olika typer av celler har också olika förmåga att reparera uppstådda skador. Generellt har tumörceller

sämre reparationsförmåga jämfört med de flesta friska celltyper. Detta kan man utnyttja genom att fraktionera behandlingen. Det betyder att man delar upp behandlingen i flera fraktioner. På så sätt kan friska celler som utsatts för strålning återhämta sig och reparera skador mellan fraktionerna. Den biologiska effekten av en viss absorberad dos som givits i flera fraktioner kan alltså variera för olika typer av celler.

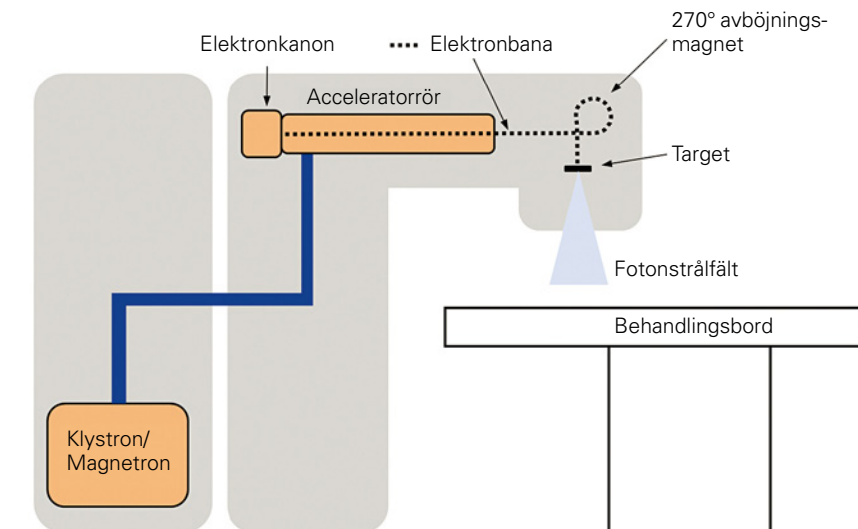
Varje patients behandling optimeras med avseende på risk–nytta-balansen i varje specifikt fall. Man strävar efter att maximera sannolikheten för bot, det vill säga att slå ut alla cancerceller, men samtidigt minimera risken för allvarliga skador i frisk vävnad som kan orsaka biverkningar av behandlingen. Hur denna balans uppnås optimalt kan vara individuellt för varje patientfall och krav på individuell optimering av varje enskild behandling är specificerat i ”Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om medicinska exponeringar” (SSMFS 2018:5). Som sjukhusfysiker inom strålbehandling arbetar man tätt tillsammans med specialiserade läkare inom onkologi i detta optimeringsarbete. Här krävs kombinerade kunskaper inom strålningsfysik, strålningsbiologi och medicin.

Strålbehandlingsteknik

Behandlingsteknikerna inom strålbehandling är många och varierande. Man brukar dela in strålbehandling i två huvudgrupper, intern och extern strålbehandling.

Intern strålbehandling kan i sin tur delas in i de två grupperna radionuklidterapi och brachyterapi. Vid radionuklidterapi injiceras lösningar med radioaktiva isotoper och med kemiska egenskaper som gör att de radioaktiva ämnena ackumuleras i patientens tumörvävnad. Brachyterapi kan användas för lokaliserade tumörer då solida radioaktiva preparat placeras i patienten, bredvid eller i tumören, under en viss tid och sedan avlägsnas.

Den vanligaste formen av strålbehandling är extern strålbehandling, där man från olika riktningar fokuserar strålfält mot tumörområdet och bestrålar patienten från utsidan av kroppen.



FIGUR 2 Schematisk bild av en linjäraccelerator som används för extern strålbehandling med fotoner. Elektroner accelereras i en linjär bana med hjälp av mikrovågor med hög effekt som styrs av en magnetron eller klystron. Elektronerna krockar med ett så kallat ”target” (ofta konstruerat av volfram och koppar) och genererar ett fotonstrålfält.

ten från utsidan av kroppen. Inom modern extern strålbehandling produceras strålningen i behandlingsmaskinen med utgångspunkt från laddade partiklar som accelererats. De laddade partiklarna kan användas direkt för bestrålning, till exempel vid protonstrålbehandling då man använder protoner som vanligen accelererats i en cyklotron eller synkrotron. För fotonstrålbehandling är det elektroner som accelereras i en linjäraccelerator. Man låter sedan elektronerna kollidera med ett så kallat ”target” för att generera fotonstrålning (figur 2). Dessa fotonstrålbehandlingsmaskiner kallas i dagligt tal för linjäracceleratorer och är den vanligaste behandlingsmaskinen vid extern strålbehandling.

Förutom att olika behandlingsmaskiner ger olika strålslag finns också flera olika varianter av behandlingsmaskiner med specialfunktioner som är extra lämpliga för specifika typer av behandlingar. Som exempel kan nämnas en av de senaste utvecklade behandlingsmaskinerna som kombinerar en linjäraccelerator med en magnetkamera. Detta möjliggör att man kan generera magnetkamerabilder samtidigt som man bestrålar patienten, för att till exempel följa eventuella tumörrörelser under behandlingen och anpassa behandlingen därefter.

Sjukhusfysikerns roll inom strålbehandling

Inom dagens strålbehandling har man som sjukhusfysiker en viktig roll där man arbetar i nära samarbete med övrig sjukvårdspersonal. Arbetet innehåller allt från ansvar för att kvalitetssäkra behandlingarna, till exempel att säkerställa att fältet från en extern behandlingsmaskin är korrekt, till att vara delaktig i optimeringsarbetet för varje patients individuella behandling.

Forskning och utveckling är också en viktig del av en sjukhusfysikers arbete inom strålbehandling och spänner över hela området, från teknik, fysik och strålningsbiologi till medicinska patientstudier. Ungefär 40% av sjukhusfysikerna som jobbar inom strålbehandling i Sverige är disputerade och forskningen är en viktig drivkraft i den ständigt pågående utvecklingen inom strålbehandlingsområdet.

ANNA BÄCK

Överförstesjukhusfysiker,
Docent i medicinsk strålningsvetenskap,
Avdelningen för medicinsk strålningsvetenskap, Göteborgs universitet,
Medicinsk fysik och teknik, Terapeutisk strålningsfysik, Sahlgrenska Universitetssjukhuset, Göteborg

Hårda fysikklappar att lägga under granen

Med bara några dagar kvar till jul kan kanske

Fysikaktuellt's boktips mildra stressen.

Är du redan klar med inköpen av julklappar?

Ingen fara! De här böckerna passar lika bra för dig som mest letar efter något trevligt att läsa i mellandagarna.



Handbok för medborgare i universum

Ulf Danielsson, Johannes Heldén (illustrationer)

Förlag: Fri Tanke

Utgivningsår: 2022

ISBN: 978-91-89-52651-8



Nu är det vår tur. Intergalaktiska intresseorganisationen, IIO, har gett ut en specialutgåva av sin handbok tillägnad oss. Tyvärr är anledningen allvarstygnd. IIO kan, med sitt tio miljarder år långa perspektiv på civilisationers uppgångar och fall, konstatera att vår mänskliga teknologiska civilisation är hotad av undergång. Vi är en rödlistad art. En oturlig slump gjorde att våra gamla skogar och algfyllda hav inte gömde sina lager av kol ordentligt utan tillät oss att bygga upp en civilisation helt och hållet styrd av tillgången på saker som går att elda upp. Nu behöver vi all hjälp vi kan få för att förstå hur vi kan undvika en annalkande klimatkollaps.

Men IIO är enligt sina direktiv förhindrad att avslöja sådana vetenskapliga fakta för oss som vi inte redan känner till. Historien visar att en art på mänsklighetens nivå omedelbart skulle missbruka sådan kunskap, göra den farlig för både oss själva och vår omgivning. Det är alltså kunskap vi redan har som vi hittar i handboken, men insatt i ett kosmiskt perspektiv där jämförelser görs med civilisationer från andra delar av universum. Så information kan vi enligt direktiven få till oss,

bara de exakta positionerna hemlighålls. Således får vi bland annat läsa om de intelligenta blinda maskarna vars värld förintades av en asteroid de aldrig såg komma, och om de räknande tusenfotingarna i stjärnbilden Berenikes hår som hörde till universums allra bästa matematiker men aldrig brydde sig om att utveckla någon tekniskt avancerad civilisation. Sånt ger perspektiv!

Vi kan glädja oss åt att IIO funnit en redaktör för den jordiska utgåvan av handboken, Ulf Danielsson, som med råge uppfyller de krav organisationen ställt på boken. Nivån på framställningen är verkligen "anpassad till en genomsnittlig medborgare på planeten" och redaktören lyckas hela tiden hitta liknelser som gör det enkelt att koppla ihop det stora (eller lilla) allmänna med våra konkreta vardagsfarenheter. Dessutom är boken underhållande och välskriven, och redaktören har också lyckats leta upp förbluffande många anspelningar på vår science fiction-genre som på ett oförklarligt sätt letat sig in i handboken. Hur kan detta komma sig, första upplagan av handboken gavs ju ut för lite drygt tio miljarder år sedan?

DET ÄR INTE ALLTID som populärvetenskaplig litteratur lyckas bli just "populär", alltså tillgänglig för var och en. Men Ulf Danielssons *Handbok för medborgare i universum* passar som julklapp till alla med nyfikenhet och en gnutta leklynne i behåll.

ANNE-SOFIE MÄRTENSSON
Göteborgs universitet

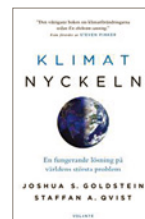
Klimatnyckeln

Staffan Qvist, Joshua Goldstein

Förlag: Volante

Utgivningsår: 2019

ISBN: 978-91-88-86947-0



Det är en tidig söndagsmorgon i slutet av oktober och jag doppar mig i det kalla vattnet vid Barsebäcks hamn. Vattnet är kallt men uppfrysande och kaffet smakar lite bättre efteråt när jag tittar ut över sundet och låter morgonsolen värma mig. För inte alltför många år sedan hade vattentemperaturen i vattnet här varit flera grader högre. Då värmdes det, på grund av märkliga kompromisser, upp av kärnkraftverken som just nu monteras ner, men vars karakteristiska silhuetter fortfarande avtecknar sig i morgonsolen. Vi har en ny regering som gick till val på att åter bygga kärnkraftverk i Sverige, och boken som jag just nu läser för att recensera i *Fysikaktuellt* är ett enda långt brandtal för att detta är den enda lösningen på klimatkrisen. Samtidigt hör vi dagligen om hur utsatta kärnkraftverken i Ukraina är under Rysslands invasionskrig.

Kärnkraft är kanske en del av lösningen på klimatkrisen, men det är inte en så enkel fråga som författarna vill framställa det som. Som uppvuxen i Skåne tänker jag inte först på kusten och bad när jag hör ortsnamnet "Barsebäck", tankarna går istället direkt till kärnkraftsfrågan med hela dess komplexitet. Som barn växte jag upp med Hasse och Tage och i en oförglömlig

sketch förklarar Tage Danielsson att sannolikheten att olyckan i Harrisburg inträffade var så liten att den nog trots allt aldrig hände. Kanske inträffade inte heller olyckorna i Tjernobyl och Fukushima, och de ryska attackerna mot Zaporizjzja händer förhoppningsvis inte heller...

NÄR NÅGON SÄGER att de har den enda lösningen på ett komplext problem brukar man göra klokt i att inte köpa deras argument rakt av. Med det sagt är *Klimatnyckeln* en välskriven bok som är högst aktuell i en tid där vi måste göra något åt de ökande koldioxidutsläppen och de globala orättvisorna, men den ska läsas som ett inlägg i debatten.

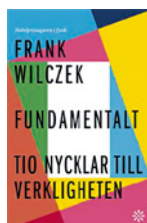
I *Klimatnyckeln* argumenterar Joshua S. Goldstein och Staffan A. Qvist väl för sin ståndpunkt att kärnkraften snabbt ska byggas ut. Boken är full av siffror och referenser och efter en märklig inledning hittar författarna tillslut en lite mer balanserad stil.

Kärnkraftsfrågan har återigen seglat upp i den politiska debatten och boken passar väl under julgranen.

JOHAN MAURITSSON
Lunds universitet

Fundamentalt – Tio nycklar till verkligheten

Frank Wilczek
Förlag: Volante
Utgivningsår: 2022
ISBN: 978-91-79-65217-3



”Att skriva den här boken förändrade min upplevelse av världen”. Så beskriver Frank Wilczek, en av teoretikerna bakom kvantkromodynamiken, vad som hände honom under arbetet med den senaste boken, *Fundamentalt – Tio nycklar till verkligheten*. Och det är inte utan att just den synvändan också når mig som läsare.

De nycklar Wilczek tar fram är av två slag. De fem första är alla mängdrelaterade och beskriver vad som finns: Det finns gott om rum, gott om tid, gott om materia och energi, men tvärtom oerhört få grundläggande beståndsdelar och lagar att styra dessa med.

Att det finns ofattbart mycket rum bara i den del av universum som är synbar för oss är en sak, men när Wilczek jämför detta med vad som finns i alla våra inre rum är det ändå överflödet i mikrokosmos som segrar: Antalet atomer i en enda människa motsvarar ungefär en miljon gånger antalet stjärnor i hela det observerbara universum. Och när vi får för oss att ett människoliv är obetydligt kort i förhållande till de eoner av tid som gått sedan universum skapades så finns det skäl att uppmärksammas på att den tid en människa fått sig given mellan födelse och död kan räcka till att rymma svindlande en miljard av distinkta tankar...

Rikedomerna i rum, tid, materia och energi står i skarp kontrast till att det är så påvert när det gäller vilka byggstenar universum är uppbyggt av. Antalet olika fundamentala partiklar är så få, och de grundläggande egenskaperna som dessa kan ha och som skiljer dem åt är ännu färre: blott massa, laddning och spinn. Från dessa kan alla andra egenskaper härledas. Jag leker med tanken på hur alla adjektiv ska kunna plockas fram från dessa tre. Hur blir en blick hård, en katt kelen och en bok läs-värd?

De följande nycklarna beskriver vår bild av den kosmiska historien, hur komplexitet kan växa fram ur det enkla, och hur mycket mer det finns att se. Här får vi bland annat göra bekantskap med Fisk-Newton, en mycket begåvad individ av en mycket begåvad fiskart som lever i en vidsträckt, istäckt ocean, snarlik den som finns på Jupiters måne Europa. Trots det handikapp som ett fluidliv och sinnen anpassade till detta innebär så lyckas denna Fisk-Newton frigöra sig och finna de lagar som beskriver en mer fundamental underliggande verklighet. En av våra egna svarigheter, Peter Higgs, har på samma sätt utvidgat vår perception och därmed helt förändrat synen på det tomma rummet.

DEN NIONDE NYCKELN öppnar för några av de mysterier vi redan nu vet kvarstår: Varför går tiden bara åt ett håll? Vad döljer sig bakom den mörka materian och den mörka energin? Den tionde och

sista nyckeln kan ses som ett verktyg för hur vi kan angripa de återstående mysterierna – och andra problem vi står inför. Wilczek förespråkar komplementaritet som förhållningssätt: ”Världen är enkel och komplex, logisk och besynnerlig, lagbunden och kaotisk” med betoning på *och*. En fundamental beskrivning av verkligheten kommer inte att upplösa dessa motsättningar utan belysa och fördjupa dem. Och de människor som ska hantera denna verklighet behöver känna både ödmjukhet och självrespekt. Inse att deras kroppar och omvärld lyder under fysikens lagar men att de ändå ansvarar för de beslut de fattar.

DET HÄR ÄR EN bok att läsa, och läsa om. Därför rekommenderar jag den inte till julklappssäcken. Låt den istället ta plats i den egna bokhyllan. Själv ser jag fram mot att påbörja en första omläsning när stjärnorna börjar gnistra och glimma på annandagen. Av de där bortåt en miljard tankarna som mitt människoliv kan tänkas innehålla låter jag gärna rätt många bli inspirerade av Wilczeks nycklar till verkligheten...

ANNE-SOFIE MÄRTENSSON
Göteborgs universitet



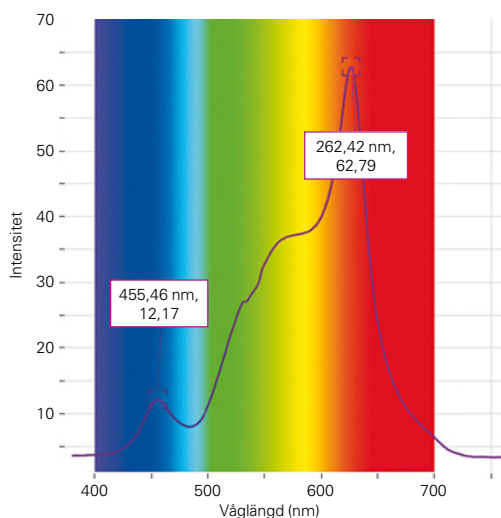


FOTO: MAX KESSELBERG

FIGUR 1 Till vänster spektrum för varmvit LED, sannolikt av InGaN. Genom att variera kvoten GaN/InN kan bandgap från 0,7 eV (InN) till 3,4 eV (GaN) erhållas. Våglängden 455 nm svarar mot ett bandgap på 2,7 eV, vilket räcker för att excitera lysämnet som ger den stearinlågeliknande färgen till höger.

Säkert med LED-ljus

Levande ljus hör julen till. Tyvärr sker 40 procent fler bränder i svenska hem i december jämfört med snittet under övriga året, enligt Trygg-Hansas skadestatistik. Därför är LED-ljusen en välsignelse. Det är däremot inte den ökande mängd batterier som står för strömmen, där vissa kan återvinnas medan andra måste deponeras.

På sjuttioalet nådde tillräckligt ljusstarka och billiga röda lysdioder, LED (light emission diode) marknaden, som bakljus till cyklar och som babordslanter. Därpå följde flera färger och vid mitten på nittioalet kom blå, vilket belönades med nobelpris 2014. En lämplig kombination av blått, grönt och rött ger vitt intryck, men dålig färgåtergivning. Bättre sådan fås om ljuset från en blå diod får träffa ett fluorescerande skikt (lysämne), vilket resulterar i ett stearinlågeliknande ljus (figur 1).

Olika varianter av "levande" ljus

De vita lysdioderna dök upp runt 2010 i bland annat värmeljus, blockljus, och kronljus. En del med fast sken, andra med varierande ljusstyrka samt artificiell, naturtrogen låga. De mest sofistikerade var försedda med timer, fotoresistor och

fjärrkontroll. För att kompetensutveckla mig, införskaffade jag de tre ljusen i figur 1, där de två vänstra har rörlig låga.

LED med varierande ljusstyrka

LED-ljus med "icke-rörlig låga" har inget som rör sig fysiskt, utan de har en eller flera lysdioder som varierar i ljusstyrka med syfte att simulera en riktig ljuslåga (ljuset längst till höger i figur 1 och figur 3). De har ett kretskort med en IC-krets som styr ljusstyrka och blinkfrekvens (till höger i figur 3).

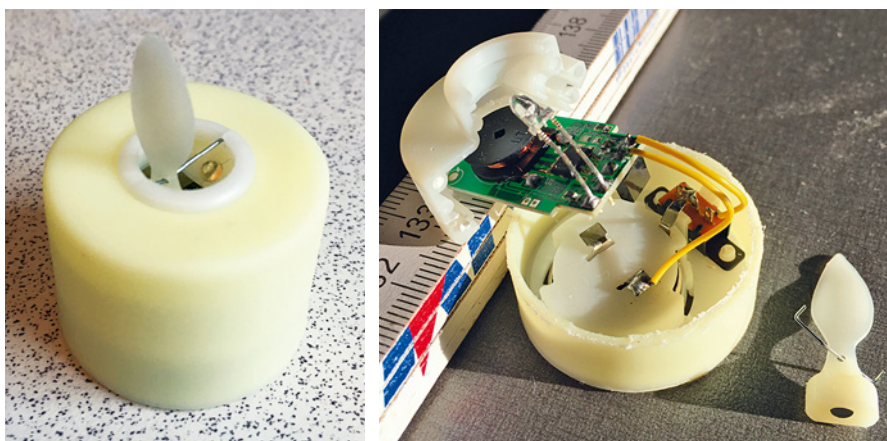
Med en fotoresistor kan ljuset också slås på när det blir mörkt och slås av när det blir ljus, perfekt för gravljus. Detta blockljus har hölje av 6 mm vax och känns med sina 320 g nästan autentiskt.

LED med rörlig låga

Mer naturtrogen ljuslåga har den variant

som utöver en LED har en tunn ljuslågeformad rörlig plastbit (figur 2). Plastbiten har ett hål genom vilket en tunn horisontell tråd löper. Övre delen utgör själva lågan, medan det i den undre delen sitter en liten permanentmagnet. Plastbiten kan därigenom göra små pendelrörelser runt tråden. Dessa exciteras av ett varierbart magnetfält från en liten spole som sitter en liten bit nedanför (till höger i figur 2). På kretskortet sitter också en IC-krets som kan styra pulserna i styrka, frekvens och varaktighet, för att ge en verklighetstrogen rörelse.

Grundkonstruktionen för rörlig låga är densamma för värmeljus, blockljus och kronljus. Blockljuset till vänster i figur 3 har hölje av 2 mm plast och väger bara 145 g. Jämfört med vaxljuset, till höger i figur 3, känns det ganska lättviktigt. Skillnaden beror också på att det vänstra



FIGUR 2 Till vänster helt värmeljus, där "lågan" kan pendla kring den horisontella tråden, under vilken lysdioden sitter. Till höger horisontellt och vertikalt itusågat ljus, där "lågan" ligger vid sidan.

drivs med två AAA, mot två AA, för det högra.

Strömförsörjning

I vårt trådlösa och bärbara tidevarv får batterier allt större betydelse. Ett batteri består av flera sammankopplade celler, men även en enda cell kallas i vardagligt tal batteri. I en sådan frigörs energin via kemiska reaktioner. Utöver kemin skiljer sig olika batterityper avseende spänning, kapacitet och dimensioner.

För att driva modern elektronik räcker 3 V. Därför lämpar sig turligt nog två seriekopplade alkaliska celler som ger 1,5 V var eller en Li-joncell som ger upp mot 3,7 V.

Kapaciteten, eller energiinnehållet i ett batteri anges i Ah eller i kWh. För att jämföra förbrukare som drivs med samma spänning lämpar sig Ah. Exempelvis anges kapaciteten i mAh för batterier till mobiltelefoner, ficklampor och annan elektronik. Likaså anges kapaciteten i Ah för 12 V batterier (sex seriekopplade 2 V celler) till fossilmotorer.

Värmeljuset och blockljuset i figur 2 har likadana LED och jag mätte strömmen till cirka 7 mA. Knappcellen i värmeljuset sägs ha kapaciteten 210 mAh, medan 2 seriekopplade AA har 7800 mAh. Värmeljuset förväntas därmed lysa under cirka 30 timmar, men när jag testade lyste det nästan dubbelt så länge. Blockljuset förväntas lysa närmare

50 dygn, vilket jag inte hunnit testa. Med dagljusavstängande fotoresistor borde det lysa närmare tre månader.

Batteriets ABC

På batterier återfinns *ANSI*:s (American National Standards Institute) beteckningar D, C, AA. Föga informativt, men när rörbestyckade radioapparater blev bärbara, kallades batteriet till rörets katod A, till anoden B och till gallret C. De batterier som kom efter A var mindre och betecknades AA, AAA etc.

En aning mindre kryptiska är *IEC*:s (International Electrotechnical

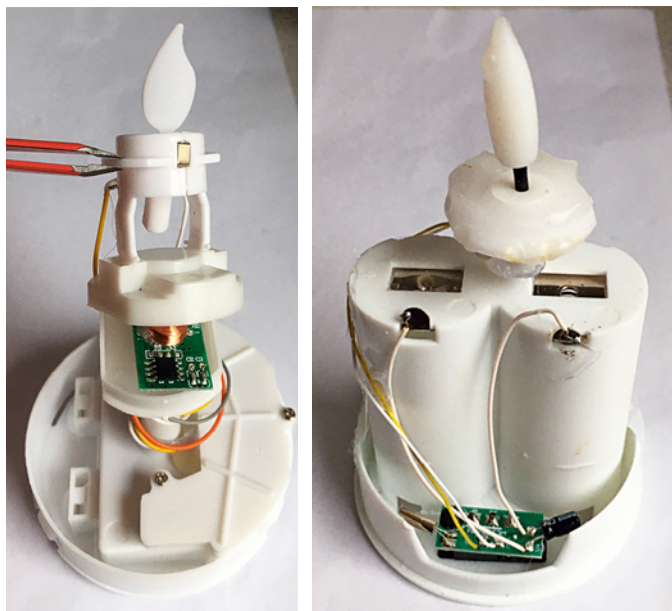
Commission) beteckningar C/LR20, C/LR14, C/LR6 etc, där C = litium, L = alkalisk och R = rund, men det numeriska överlåter jag till läsaren. Hos knappceller däremot, som CR2032 i värmeljuset ovan, betyder 20 diametern i mm och 32 tjockleken i tiondels mm.

Leclanché uppfann sitt första "batteri" år 1866, Lewis Urrys alkaliska patent kom 1959, uppladdningsbara NiCd kom på 1960-talet och NiMH kom på 1990-talet. Ingen av dessa gav nobelpris, men litiumjonbatteriet som kom på 1990-talet belönades med 2019 års nobelpris i fysik.

Återvinning

Batterier kan innehålla tungmetaller som till exempel kvicksilver, kadmium och bly, ämnen som orsakar stor skada om de kommer ut i naturen. Säkrast är att lämna alla batterier, även de som sägs vara utan kadmium och kvicksilver, till återvinning. Apparater med inbyggda batterier sorteras som elektronikavfall. Vanligast i återvinningen är småbatterier som AAA, AA och 9 V, även de uppladdningsbara. Hittills kan bara 75 procent av innehållet i våra vanligaste batterier återvinnas, resten får deponeras. Här behöver vi förbättra oss.

MAX KESSELBERG
Stockholms universitet



FIGUR 3 Till vänster isärtaget blockljus med rörlig låga. Till höger isärsågat blockljus utan rörlig låga.



NATUR &
KULTUR

Fysik för gymnasiet – tryckt och digitalt!

Fysik för gymnasieskolan 1 och 2 är ett nytt digitalt läromedel som visar att fysik är fantastiskt och spännande. Här finns allt! Exempel från vardagen, begreppslistor och den stora mängden uppgifter stöttar eleven i sin inläring.



**Prova
30 dagar!**



**Ny
omarbetad
upplaga!**

Heureka! har en självklar plats i fysikundervisningen på gymnasiet och nu är det dags för en omarbetad upplaga. Nya *Heureka!* är utvecklad i samarbete med ledande fysiker och lärare. Kommer till HT22.

Läs mer på nok.se