

Kvantfysikens gränser · Öl · Oseenmedaljen 2025

Fysikaktuellt

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDET

NR 2 • MAJ 2025



Sagan om de sex tornen

ISSN 0283-9148

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: Michael Odelius,
odelius@fysik.su.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

Adress för recensionsexemplar av böcker:
C. Kjellstrand c/o Blenda Journalistik
Rörsjögatan 26, 211 37 Malmö

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, Nils Hermansson Truedsson, Mats Larsson, Johan Mauritsen, Anne-Sofie Mårtensson, Asta Pellinen Wannberg och Elisabeth Rachlew.

Ansvarig utgivare: Michael Odelius.

Kontakta redaktionen via:
fysikaktuellt@fysikersamfundet.se

För insänt, ej beställt material ansvaras inte.

Manusstopp och deadline för annonsbokning:
för Fysikaktuellt 3/2025 är 6 augusti 2025.

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 os Fri Tanke förlag.
Ange koden "fysikersamfundet" i kassan på fritanke.se.
- Förmånsprenumeration på Forskning & Framsteg.
Erbjudandet gäller 10 nr (20 % rabatt).
Länk till beställningssida:
<https://order.flowy.se/fof/fof/4140>

Layout: Christina Kjellstrand

Tryck: Trydells, Laholm 2025



OMSLAGSBILDEN: Alla som passerat genom Halland på E6:an har nog lagt märke till de sex höga fackverkstornen öster om Varberg. De utgör en del av radiostationen i Grimeton, som byggdes för 100 år sedan för att kunna kommunicera över Atlanten utan att behöva förlita sig på telegrafkablar. Läs mer på sidan 14.
Foto: Wikimedia/Chrumps

Stödjande medlemmar

- Glerups Utbildning AB
www.glerups.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
- 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
- Mälardalens universitet
– Avd för matematik och 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**
Herbert Gunell
- 4 **AKTUELLT**
- 5 **AVHANDLINGEN**
Oseenmedaljen 2025
går till Ann-Kathrin Raab
- 9 **GOD FYSIK**
En pint fysik
- 12 **WALLENBERGS FYSIKPRIS**
Rekordung segrare
tog hem guldmedalj
- 14 **GRIMETON 100 ÅR**
- 16 **KVANTFYSIKENS GRÄNSER**
- 18 **FRÅN DOKTORAND
TILL "TV-FYSIKER"**
Patrik Norqvist om att
popularisera vetenskap
- 20 **PTOLEMY**
Kosmologins
svåraste mätning?
- 22 **OPTISKA MOTORER**
- 24 **RADIOASTRONOMI**
Passivt skydd på
agendan för WRC 2027
- 27 **ATT SE INUTI KROPPEN MED
LJUS OCH ULTRALJUD**
- 30 **VARDAGENS FYSIK**
Smarta klockor
för träning och hälsa



Som nybliven doktorand drömde Patrik Norqvist om att, likt Hans-Uno Bengtsson, stå på scen och göra fysik både begriplig och häftig. Läs mer på sidan 18.

Ny kunskap slutar aldrig fascinera

Första gången jag såg en komet på riktigt var 1996, då kometen Hyakutake kunde ses med blotta ögat i Stockholm där jag bodde. Med blotta ögat? Jo, men den var inte mer synlig än att man kunde ana att det var en komet, men knappast se några ytterligare detaljer. Redan året därpå, 1997, dök kometen Hale-Bopp upp på natthimlen. Den är den mest spektakulära jag har sett hittills. Den gick inte att missa, alla som varit ute en kväll då det inte var molnigt hade sett den. Ibland brukar jag skämtsamt säga att jag är besviken på solsystemet som bara har lyckats producera en spektakulär komet, som synts där jag har varit, på över 50 år. Nu är det förstås inte meningsfullt att vara besviken över det. Det kommer kometer hela tiden, men de flesta behöver man teleskop för att kunna se. För att en komet ska synas tydligt ska den vara aktiv, det vill säga släppa ut mycket gas och damm, och komma nära både solen och jorden.

När Hale-Bopp och Hyakutake visade sig hade jag ingen aning om att jag skulle komma att jobba med kometer, men sedan 2014, när ESA:s rymdfarkost Rosetta kom fram till kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko, har jag gjort just det, och vi vet mycket mer om kometer nu än vad vi gjorde då. Det som är så fascinerande med forskningen är att det inte bara är jag som lär mig mer, utan det som vi lärt oss nu var det *ingen* som visste för tio år sedan.

Kometerna förändras mycket när de rör sig genom solsystemet: långt från solen är de djupfrysta snöbollar, men när de kommer närmare förångas gaser från ytan och det byggs upp en atmosfär som för en aktiv komet kan bli lika stor eller större än atmosfärerna på planeter som jorden och Mars. Det gör att en komet blir ett slags laboratorium för undersökningar som även är relevanta för planetforskningen. När jag har hållit populärvetenskapliga föredrag om rymden brukar just kometer väcka störst intresse. Jag brukar förklara de två



olika sorternas svansar som kometer har: dammsvansen som byggs upp av att små dammkorn trycks iväg i riktningen bort från solen av fotontrycket, och jonsvansen som består av joner från kometatmosfären som plockas upp av solvinden.

Vad händer inom kometforskningen nu? Jo, runt om i Europa och Japan byggs det på instrument till ESA:s nästa kometprojekt: Comet Interceptor. Enligt planerna ska den skjutas upp 2029 och sedan ligga i rymden och vänta på att en ny komet upptäcks. Därefter ger sig rymdfarkosten av för att flyga förbi kometen när den är tillräckligt nära. Tanken är att man ska få närbilder av en kometkärna som inte tidigare har påverkats av solstrålningen. Just innan förbiflygningen släpper rymdfarkosten iväg två små rymdsonder, en europeisk och en japansk, så att man kan göra mätningar i tre punkter samtidigt. Det här är särskilt spännande och lite nervöst, eftersom vi alltså ännu inte vet vilken komet som kommer att besökas och vad den har för egenskaper.

Herbert Gunell

HERBERT GUNELL

Universitetslektor vid Institutionen
för fysik, Umeå universitet

Ny generaldirektör för Rymdstyrelsen

■ Den 1 december tillträdde Ella Carlsson som ny generaldirektör för Rymdstyrelsen. Carlsson är civilingenjör i rymdteknik och doktorerade 2008 vid Luleå Tekniska Universitet (tu.diva-portal.org/smash/get/diva2:989784/FULLTEXT01.pdf).

Hon kommer närmast från Försvarsmakten, där hon har varit rymdchef och chef för rymdavdelningen.

Konferens för mångfald på Chalmers

■ Den sjunde NORNDiP-konferensen (Nordic Network for Diversity in Physics) kommer att hållas på Chalmers den 18–19 november i år. Konferensen, som är gratis, har i år temat "Diverse Trajectories – Challenging the Norms in Physics, Research, and Culture".

Huvudtalare är astrofysikern Jocelyn Bell Burnell (Cambridge universitet), mest känd för att ha upptäckt pulsarer, och fysikern Jessica Wade (Imperial College, London). Mer information om konferensen hittar du på www.norndip.net/conference/2025.

Göran Gustafssonpris till Feng Gao

■ Årets Göran Gustafssonpris i fysik gick till Feng Gao, professor i optoelektronik vid Linköpings universitet för hans arbete med organiska halvledare och metallhalid-perovskiter som kan användas till både solceller och lysdioder.

Priset i matematik gick till Klas Modin, Chalmers tekniska högskola och Göteborgs universitet, för hans arbete med strömningsekvationer.

Kumla-lärare prisad

■ Genom Ingvar Lindqvistprisen vill Kungl. Vetenskapsakademien visa på lärarnas viktiga roll i samhället. I år gick fysikpriset till Kristoffer Åberg på Vialundskolan i Kumla.

– Jag var inte alls förberedd på det här men det känns fantastiskt att få uppskattning för det man gör, säger Åberg.

Nöd drop till ministrarna

■ Bara 47 % av ansökt belopp för resor och deltagandeavgifter till vetenskapsolympiaderna. Det var chockbeskedet som de som håller i de svenska uttagningstävlingarna fick från Skolverket i mars.

Nu har dessa i en gemensam skrivelse till Utbildnings- och Skolministern påtalat hur konsekvenserna ser ut, och samtidigt bett om ett möte. Hans Jakobsson, ordförande i Fysikersamfundets undervisningssektion, är en av de tolv undertecknarna:

– Låt oss få träffa er och presentera det arbete vi gör och förklara varför det är så viktigt! Om inte staten tar ansvar för själva olympiaddeltagandet finns risken att Sverige, trots en rykande färsk STEM-strategi, för första gången på decennier missar de internationella olympiaderna. Detta i en tid då fredliga internationella mötesplatser är viktigare än någonsin förr. Det vore sannerligen uppseendeväckande.

Final för unga stjärnor

■ En långhelg i mitten av april gästades Råö och Fysikcentrum i Göteborg av 14 förväntansfulla grundskoleelever: Det var dags för träningsläger och svensk final inför *Internationella astronomiolympiaden – Junior* där man måste vara född 2010 eller senare för att få delta. Olympiaden har arrangerats sedan 2022 och Sverige gick med i olympiaden året därpå. Årets olympiad arrangeras i Rumänien i slutet av oktober.

Det är Astronomisk ungdom som organiserar den svenska uttagningen som startar med ett en timme långt prov i februari på de skolor som vill vara med. Frågor som till exempel "Varför är Venus varmare än Merkurius?" och "Varför är jorden sfärisk?" ska besvaras med flervalsalternativ. På träningslägret avverkades en diger lista med ämnen för att höja kunskapsnivån hos deltagarna: banmekanik, svartkroppsstrålning, rödförskjutning, Hubbles lag, stjärnors livscyklar, koordinatsystem, logaritmer, trigonometri med mera.

Lägret genomfördes av en ung skara astronomientusiaster (Claudia Skoglund, Milles Åhman, Ludvig Ersman, Doniyor Baltayev och Omar Wehbeh) med



FOTO: MOSTAFA KERIM

Olympiaddeltagare vid Chalmers entré.

erfarenheter från bland annat eget tävlande på astronomiolympiader. Dessutom deltog Anders Västerberg som varit med och arrangerat uttagningar till Internationella astronomiolympiaden i över 20 år. Projektledare var Mostafa Kerim, till vardags förstaårsstudent i Lund:

– Jag är jätteglad att ha fått vara med och skapa en så härlig miljö för dessa ungdomar. Deras kunskap och starka vilja att lära sig har varit så otroligt kul att se, och det är helt klart deras driv och glädje som motiverar mig till att fortsätta arbeta ideellt med detta.

Och det fanns skäl för arrangörerna att vara nöjda med sin insats: Deltagarna gav lägret betyget 9,2 stjärnor av 10 möjliga i den avslutande utvärderingen!

Saknar du medlemsavin?

■ Har du inte fått din medlemsavi? Vi har haft problem med att mejlen med avier "studsar". Kolla gärna så att mejlet med din avi inte hamnat i skräpposten, att din mejlkorg inte är full eller att du inte har en gammal adress i medlemsregistret!

Behöver du en ny avi? Mejla samfundets skattmästare på lage.hedin@physics.uu.se! Du kan också betala din medlemsavgift direkt till bankgiro **5402-5499**. Kom i så fall ihåg att ange namn och adress.

Tävlingar gav mersmak

Oseenmedaljen 2025 tilldelas **Ann-Kathrin Raab** från Lunds universitet med avhandlingen "Ultrafast ytterbium-based laser sources and diagnostics for efficient high-order harmonic generation", för hennes bidrag till utvecklingen av ultrasnabba ytterbiumbaserade laserkällor.

Det var en tidig morgon i mitten på mars som Ann-Kathrin Raab öppnade sin e-post och såg ett mail med titeln "Oseenmedaljen 2025". Årets medaljör tilldelas Svenska Fysikersamfundets pris för bästa svenska avhandling för sitt bidrag till utvecklingen av ultrasnabba ytterbiumbaserade laserkällor. Den första känslan var en blandning av chock och förtjusning, samt en glädje att avhandlingen uppskattats så mycket. En dryg vecka senare intervjuar *Fysikaktuellt* den nyblivna Oseenmedaljören för att få veta mer om hennes arbete och liv.

Ann-Kathrin växte upp i södra Bayern, i den mindre staden Rosenheim ungefär halvvägs mellan München och den österrikiska gränsen. I gymnasiet blev hon övertalad att delta i två fysiktävlingar. Först rörde det sig om en tysk nationell tävling, Jugend Forscht, och sedan International Young Physicists' Tournament. Det var här som hennes verkliga intresse för fysik och forskning väcktes. Särskilt den internationella aspekten, med utbyte mellan deltagare från olika länder, var något Ann-Kathrin tyckte om, vilket ju i mångt och mycket representerar miljön på universitet världen över.

Efter gymnasietiden sökte sig Ann-



Ann-Kathrin Raab.

Kathrin till fysikstudier vid Technische Universität i München. Masterarbetet handlade om laser och spektroskopi. Det myckna laboratoriearbetet med samarbete inom gruppen uppskattade hon, och hon bestämde sig därmed för att fortsätta med doktorandstudier. Under mastern hade ett Erasmusutbyte vid KTH gett ett bra intryck av Sverige, inte minst vår svenska fika, och så småningom gick tåget alltså till Lund.

Huvudhandledare blev Anne L'Huillier, med Cord Arnold och Anne-Lise Viotti som biträdande. Ann-Kathrin

tycker att arbetet med handledarna och gruppen har varit både givande och lärorikt. Hon älskar att bygga saker och bidra vid olika moment i laboratoriet. Det mest oväntade under doktorandtiden var nog hur mycket man får lära sig om rör- och vattensystem på grund av behovet av vattenkylning.

AVHANDLINGEN ÄR BASERAD på sex artiklar. Det underliggande arbetet har haft skiftande karaktär och det är svårt att välja något särskilt favoritmoment, säger Ann-Kathrin. Bortsett från fysiken uppskattade hon mycket de estetiskt tilltalande strålmönster som uppstår i speglarna vid multipassceller (se artikeln om avhandlingen på nästa sida). I efterhand är hon väldigt glad att hon tillbringade tid med att automatisera delar av sitt arbete i experimenten, vilket med enkla knapptryck snarare än repetitiva steg sparar mycket tid i det långa loppet. Hennes automatiserade program har redan på olika sätt levt vidare inom gruppen.

Var befinner sig då vår medaljör idag? I början av februari flyttade hon för postdoktorstudier till Ohio State University i staden Columbus i USA. Där kommer hon använda sig av sina tidigare kunskaper och sin tekniska expertis från Lund, ►

Oseenmedaljen

Svenska fysikersamfundet delar sedan år 2020 ut Oseenmedaljen för bästa avhandling i fysik i Sverige. Möjliga mottagare av priset är personer som har försvarat en doktorsavhandling i fysik vid ett svenskt universitet under föregående år.



De institutioner som är stödjande medlemmar till Svenska fysikersamfundet kan skicka in nomineringar. Pristagaren erhåller en medalj, ett diplom och 100 000 SEK. Prissumman är en donation från Marcus och Amalia Wallenbergs minnesfond.

Styrelsen för Svenska fysikersamfundet beslutade att Oseenmedaljen 2025 tilldelas Ann-Kathrin Raab från Lunds universitet med avhandlingen "Ultrafast ytterbium-based laser sources and diagnostics for efficient high-order harmonic generation".

► samt vidga sina vyer mot tillämpningar inom attosekundsphysiken. På frågan varför hon valde just denna tjänst svarar vår medaljör att den såg ut att passa hennes bakgrund perfekt, och efter ett besök under sommaren 2024 hyste hon inga tvivel om att det var dit hon ville flytta. Bortom universitetet är hennes första intryck efter en dryg månad att människor i allmänhet är väldigt trevliga och sociala, vilket hon uppskattar. Hennes make arbetar nu också på universitetet, fast inom datavetenskap.

PÅ SIN FRITID HAR Ann-Kathrin, utöver en kärlek till fika, en stor passion för matlagning. Hon säger att varje matkultur har bättre och sämre sidor, och till de bästa svenska rätterna hon utan tvekan både köttbullar och Wallenbergare. Hennes egen paradrätt härrör dock ur det italienska pastaköket. Avslutningsvis gratulerar Fysikaktuellt Ann-Kathrin Raab stort till sin välförtjänta Oseenmedalj 2025, och önskar henne all lycka under sina postdoktorstudier i USA.

NILS HERMANSSON-TRUEDSSON
Edinburgh universitet

Ultrafast ytterbium-based laser sources and diagnostics for efficient high-order harmonic generation

- Författare: Ann-Kathrin Raab
- Lunds universitet, 2024
- ISBN: 978-91-7905-598-1
- Länk till avhandlingen: lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/199232559/ann-kathrin_raab_phd_thesis.pdf
- Handledare: Anne L'Huillier, professor, Cord Arnold, universitetslektor, och Anne-Lise Viotti, biträdande universitetslektor, samtliga vid Atomfysik, Lunds universitet
- Opponent: Prof. Nirit Dudovich, Weizmann Institute of Science, Tel Aviv University, Israel



Jakten på mer extremt ultraviolett ljus

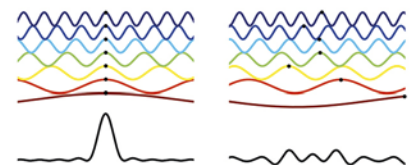
Extremt ultraviolett ljus har många användningsområden, men att få fram användbara mängder **kan bli dyrt**. I sin avhandling har Ann-Kathrin Raab bland annat förbättrat metoder för att använda billigare och effektivare ytterbium-baserade lasrar.

Extremt ultraviolett ljus (XUV) är en särskild typ av ljus med mycket korta våglängder (10–100 nm) – mycket kortare än synligt ljus (400–790 nm). På grund av detta innehåller det mycket energi, det har en hög frekvens, och kan interagera med materia på sätt som synligt ljus inte kan. XUV-ljus kan till exempel ”slå loss” hårt bundna elektroner från atomer, vilket innebär att man kan studera struktur och beteende hos material på en väldigt liten skala. På grund av dess väldigt korta våglängd kan XUV-ljus dessutom användas för att avbilda små strukturer på de längdskalor som nuförtiden används av halvledarindustrin för att tillverka kretsar till datorer.

För att effektivt kunna använda extremt ultraviolett ljus i tillämpningar som spektroskopi och avbildning är det viktigt att ljuset är koherent, det vill säga att vågorna är välordnade, som i en laserstråle (figur 1).

Ett sätt att skapa koherent XUV-ljus är genom generering av höga övertoner (high-order harmonic generation, HHG), som kan beskrivas med den berömda ”tre-stegsmodellen” (figur 2, läs också mer om detta i artikeln om Nobelpriset 2023, *Fysikaktuellt* nr 4/2023):

1) En högeffektlaser med frekvensen ω fokuseras in i en gas i en vakuumkammare. Lasern är så intensiv att den



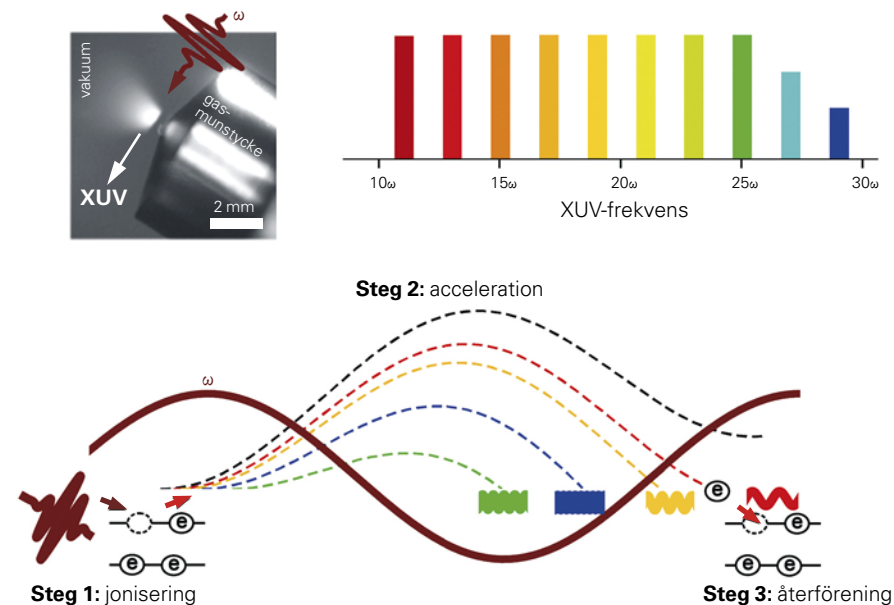
FIGUR 1: Koherent ljus (vänster) jämfört med inkoherent ljus (höger).

kan jonisera atomerna i gasen, vilket leder till att det bildas fria elektroner i gasen.

2) Det starka laserfältet accelererar dessa fria elektroner bort från de ”moderatorer” de kom ifrån, men eftersom laserfältet svänger kommer det att byta riktning. Elektronerna accelereras då åt andra hållet, alltså tillbaka mot moderatorerna.

3) Elektronerna samlar på sig en mängd kinetisk energi, och kan sedan återförenas med moderatorerna. När de gör det omvandlas den kinetiska energin till fotoner med hög energi (och därmed frekvens) – det vill säga XUV-ljus.

Beroende på exakt när, i relation till laserfältet, atomerna joniseras får deras elektroner olika banor. Det bestämmer deras exakta energi vid återföreningen med atomerna, och därmed också frekvensen på det extrema ultravioletta ljuset. Den här processen händer om och om igen för varje halvcykel i laserfältet. På grund av interferenseffekter blir resultatet en ”kam” av övertoner av udda ordning, som är multipler av laserns fältfrekvens.



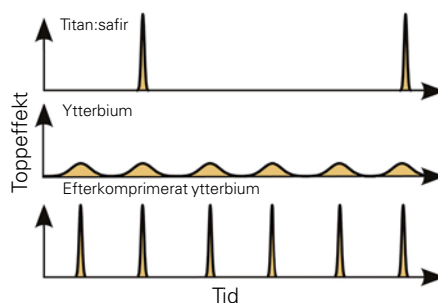
FIGUR 2 Trestegsmodellen för generering av höga övertoner.

HHG är ett bra sätt att få fram extremt ultraviolett ljus med utmärkta koherens-egenskaper, och kan därmed till och med användas för att generera attosekund-pulser (Nobelpriset 2023). Men metoden har en stor nackdel: mängden XUV-ljus som skapas är väldigt liten, jämfört med den effekt på lasern som måste användas. För att HHG ska vara ett användbart verktyg i praktiska tillämpningar har sökandet efter en metod för att öka mängden XUV som skapas vid generering av höga övertoner blivit sin egen forskningsgren. Det finns två huvudstrategier: dels att förbättra laserfältet, och dels att justera själva HHG-processen.

TACK VARE FRAMSTEG i laserteknologin under de senaste två decennierna har hög-energilasrar baserade på ytterbium blivit populärare, på bekostnad av de väletablerade titan-safir-lasrarna. Ytterbium-lasrar är billigare att framställa och driva, och dessutom effektivare. Eftersom ytterbium-lasrar inte överhettas lika lätt som titan-safir-lasrar kan man använda en högre upprepningsfrekvens (laserpulser per sekund). Men ytterbium-lasrarna har en stor nackdel. Ytterbium är ett material som bara avger ett smalt band av våglängder. Enligt samma princip som vid generering av attosekundpulser så gäller att ju fler olika frekvenser (eller våglängder) som överlappas koherent, desto kortare

och intensivare kan laserpulsen bli. Detta beskrivs ofta som den möjliga "toppeffekten" per puls. För ytterbiumlasrar innebär detta att dess (många) laserpulser kan ha en energi jämförbar med titan-safir, men ändå sakna de för HHG nödvändiga toppeffekterna. Lösningen för att få mer XUV-ljus per sekund i HHG är att "klämma ihop" energin i laserpulserna i tiden, en process som kallas "efterkomprimering" (figur 3).

FÖR ATT GÖRA LASERPULSER kortare måste spektrumet, det vill säga de olika våglängder som laserpulsen innehåller, bli bredare så att ett större antal frekvenser kan överlappa koherent. För att göra detta kan man använda en icke-linjär metod, den så kallade Kerreffekten. Den innebär att om ljusets intensitet är tillräckligt hög när det kommer in i ett material, till exempel glas, så kommer dess

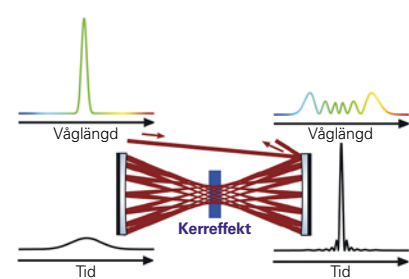


FIGUR 3 Schematisk jämförelse av laserpulser från olika källor.

brytningsindex (det vill säga hur mycket ljushastigheten saktas in) att ändras med intensiteten. Toppen på en laserpuls får då en annan ljushastighet än pulsens "svans", vilket leder till att nya frekvenser skapas.

En metod för att utnyttja Kerreffekten är att skicka in laserstrålen i en multipass-cell (MPC). Den vanligaste uppställningen består av två konkava speglar som om och om igen fokuserar strålen i cellens centrum. Genom snillrika beräkningar och rätt inriktning får man laserstrålen att göra ett bestämt antal rundor innan den lämnar cellen igen. Sedan behöver ett icke-linjärt material som kan bredda spektrumet introduceras, till exempel genom att placera en tunn glasskiva i mitten av MPC:n, där ljusintensiteten är mycket hög (figur 4).

Efterkomprimering med multipassceller är en väletablerad metod. Utmaningarna uppstår när den ingående lasern redan från början har så hög topp-effekt att den kan skada glaset, eller skapa oönskade effekter i laserpulsen. Ett sätt att ta sig runt det är att använda gas som Kerr-material istället för ett fast material. Men det innebär att man behöver bygga sin MPC i en vakuumkammare, vilket riskerar att bli dyrt. Vårt arbete visar att det går att använda mycket tunna glasskivor – som är relativt billiga – om de placeras nära multipasscellens speglar istället för i dess centrum. Vid tidpunkten för den här forskningen kunde vi uppnå efterkomprimering med en faktor 10 av en ytterbiumlaser i en MPC med glas. Samtidigt kunde vi säkerställa att de då rekordhöga toppeffekterna för både inkommande och utgående ljus inte på något vis försämrade laserpulsen kvalitet – en försämrings som hade förutsatts i standardlitteraturen. Andra efterkomprimerings-forskare har ►

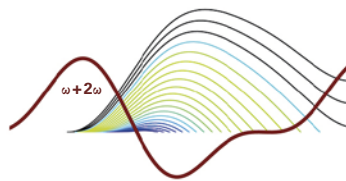


FIGUR 4 Principen för efterkomprimering i en multipasscell (MPC).

► arbetat vidare med den här upptäckten, och fortsätter att tänja på gränserna för effektiv användning av ytterbiumlaser vid generering av höga övertoner.

DE FRÅN BÖRJAN långa laserpulserna från ytterbium-baserade källor har inte bara nackdelar för HHG-forskning. Deras relativt smala spektrum förenklar både felsökning och många experimentuppställningar. Om frekvensområdet är litet redan från början kan man ju garantera en väldefinierad relation mellan de olika frekvenserna utan att behöva vara särskilt noggrann. Vi använde detta till vår fördel och byggde ett väldigt mångsidigt HHG-strålrör där vi nu använder oss av den andra huvudstrategin för att få mer XUV-ljus – att manipulera själva HHG-processen. Mer specifikt arbetar vi med det andra steget i trestegsmodellen.

Beroende på hur mycket laser som används av vilken frekvens, och vilken tidsfördröjning de olika färgerna har relativt varandra, kan laserfältets form justeras



FIGUR 5 Tvåfärgs-HHG som leder till att många elektroner återvänder med samma kinetiska energi.

kraftigt när en laser med den centrala frekvensen ω överlappas med till exempel två gånger dess frekvens (2ω). Det här kallas ”tvåfärgs-HHG” (figur 5). Med den metoden kan banorna hos de fria elektronerna i trestegsmodellen justeras, vilket också påverkar deras kinetiska energi när de återvänder till moderatomen. Därmed påverkas också frekvensen på det XUV-ljus som sänds ut. Tvåfärgs-HHG har tidigare använts för många tillämpningar, inklusive att forma XUV-spektrumet så att det når högre energier, och för att öka mängden XUV-ljus som skapas. Det senare görs genom att välja den relativa fördröjningen och förhållandet mellan de två

färgerna på ett sådant sätt att majoriteten av elektronerna återvänder med samma energi, vilket då alltså ger mer XUV-ljus vid den specifika frekvensen.

TACK VARE VÅR ytterbium-baserade uppställning, där vi hade noggrann kontroll över våra två olika laserfärger, kunde vi ta fram en enkel metod för hur användare av HHG-tillämpningar som behöver XUV-ljus med en specifik frekvens kan forma ett tvåfärgsfält med avseende på relativ kvot och fördröjning.

Sammanfattningsvis erbjuder ytterbium-baserade laserkällor en ljus framtid för den ultrasnabba forskningen, inte bara för alla spännande tillämpningar utan också för de många upptäckterna som omger teknikkomponenterna bakom uppställningarna.

ANN-KATHRIN RAAB

Postdoktor, Ohio State University, USA

Översättning: Christina Kjellstrand

13-15
augusti

Fysikdagarna i Luleå

Svenska Fysikersamfundet
välkomnar dig till Fysikdagarna 2025
på Luleå tekniska universitet!

Här möts framtidens forskningsidéer
och erfarna pionjärer för att tillsammans
utforska det senaste inom fysikens värld.

Fysikdagarna innehåller föreläsningar,
workshops och studiebesök.

Ta chansen att knyta värdefulla kontakter
med kollegor och framtida
samarbetspartners.

Skanna koden,
läs mer om
Fysikdagarna
och registrera dig.



Plenarseminarier

Attosecond lasers

Anne L'Huillier, Lund University.

Trapping particles: From research on anti-matter to teaching experimental physics in high-schools

Dag Hanstorp & Jonas Enger, University of Gothenburg.

Molecular spectroscopy with frequency combs

Aleksandra Foltynowicz, Umeå University.

Quantum Computing

Per Delsing, Chalmers.

Post-Li batteries

Axel Gross, Ulm University.

Can you learn by playing games?

Erik Elfgrén, Luleå University of Technology.

The second AI revolution in fundamental science research

Tommaso Dorigo, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare.



FOTO: JOHAN MAURITSSON

GOD FYSIK

Lager, lättöl och skumkrona i en pint fysik

Sommaren är nästan här, och ju varmare det blir ute, desto större blir behovet av att snabbt och effektivt **kyla sin öl**. Som fysiker löser man förstås enkelt det med hjälp av lite termodynamik. Men hur håller man sen bäst upp sin kylda öl? Och varför blir bubblorna så annorlunda i en Guinness?

Hasse och Tage funderade i 88-öresrevyn 1970 över hur det skulle gå för barnen när de växte upp. Det var en dyster framtid som de såg när de grubblade över ett glas öl. Som så ofta var de långt före sin tid och använde humor för att belysa samhällsproblem som är minst lika relevant idag. Men, när det gäller öl finns det andra och mindre dystra saker att grubbla över, exempelvis en hel del intressant fysik. Det finns flera experiment som du kan undersöka när solen skiner och du vill ha en kall pilsner.

Efter att ha studerat fysiken i en flaska

champagne (*Fysikaktuellt* nr 4/2023) och i kaffe (*Fysikaktuellt* nr 1/2025 och *Fysikaktuellt* nr 2/2022) har turen nu kommit till termodynamiken i en burk öl. Sommaren närmar sig hastigt, och med den behovet av att snabbt och effektivt kyla sin dryck. Här kan termodynamiken komma till undsättning.

DET FINNS OLIKA TIPS för att kyla ner drycker, med olika grad av kreativitet, komplexitet och krav på utrustning. Val av metod beror på hur mycket tid man har och vilken sluttemperatur som är önskvärd. En

industrilager från Mexiko vill man kanske snabbt kyla till -3°C för att dölja felsmakerna, medan en välbryggd stormaktsporter från Närke kulturbryggeri passar bättre från 14°C och uppåt.

Termodynamikens första huvudsats och Newtons avsvlningslag ger oss flera ledtrådar om vad vi har att jobba med.

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{-hA}{mc} (T(t) - T_{\text{omg}}) = \frac{-1}{\tau} \Delta T(t)$$

Med lösningen

$$T(t) = T_{\text{omg}} + (T(0) - T_{\text{omg}})e^{-t/\tau}$$

Här ser vi att temperatursänkningens hastighet beror på tre parametrar som ►



Ett klassiskt trick för att sänka temperaturen är att salta vattnet ordentligt. Med rikliga mängder is och vanligt bordssalt i blandningen går det att få ner temperaturen till under -17°C .

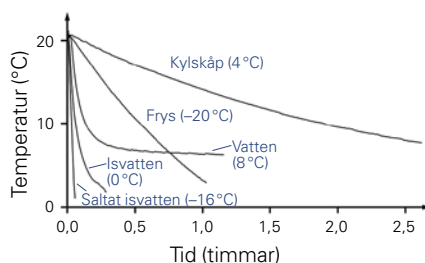


Utöver "den blöta hunden" har tjeckerna flera olika uppskattade metoder att hålla upp en välkyld pilsner med tydlig karaktär av Saaz-humle. Bilden visar tre vanliga upphällningar. I mitten den klassiska upphällningen *Hladinka* som går väldigt snabbt och ger en välbalanserad smak. Till höger en så kallad *Šnyty* som är en halv servering när man har bråttom. Den serveras med extra mycket skum vilket ger en lite rundare smak. Till vänster en *Mliko* som i princip bara är blött skum och är tänkt att dricka i ett drag. Mliko är kanske mest en rolig gimmick, men humlearomen framhävs fint i en öl som serveras på det här sättet.

► vi kan kontrollera. Det uppenbara är att sänka omgivningens temperatur, T_{omg} . Vår öl kyla fortare i frysen än i kylan. Nästa parameter vi kan skruva på är värmeövergångstalet h , vilket kan göras på lite olika sätt, men lättast kanske är att ändra omgivningen från luft till kallt vatten. Slutligen ser vi att tidskonstanten τ också beror på massan, men den verkar vid en första anblick svårare att ändra, 33 cl är ju trots allt 33 cl. Man ska dock komma ihåg att även förpackningen ska kylas ner. En burk gjord av aluminium väger mycket mindre än en glasflaska, men har ungefär samma specifika värmekapacitet.

LITE MER KREATIVA nedkylningsmetoder utnyttjar olika fasövergångar hos vatten. Ett typexempel är att vira in flaskan eller burken i en blöt handduk. När vatten sedan dunstar sänks temperaturen och drycken kyls. Tyvärr är metoden inte så effektiv, temperaturen på vår ölburk sänks bara några få grader på 30 minuter. Möjligen kan effekten förbättras med hjälp av kraftigt vinddrag.

Riktigt effektiv nedkylning görs istället i ett vattenbad, här skruvar vi på



Tidsåtgång för att kyla en burk 33 cl öl på några olika sätt.

både h och omgivningens temperatur. Isvatten gör att kylvätskan håller en konstant temperatur på 0°C , eftersom det är här fasövergången mellan is och vatten sker. För att sänka temperaturen ytterligare kan vi salta vattnet ordentligt. Vilken temperatur det blir om vi blandar vatten, salt och is beror också på hur mycket salt vi använder. Det kan bli så kallt som -18°C , det vill säga 0 grader Fahrenheit. Med rikliga mängder is och normalt bordssalt i blandningen kan man lätt få ner temperaturen till -10°C . Detta räcker för att superkyla en flaskas öl och är ett kul litet experiment. Placera din flaskas öl i isbadet och vänta en stund så att den är riktigt

kall. Eftersom flaskan är ordentligt rengjord finns inga tydliga nukleationspunkter där vätskan kan börja frysa och det går därmed att kyla den under fryspunkten. Ta försiktigt upp din flaskas öl och öppna den, knacka sedan till flaskan och notera hur drycken snabbt fryser i hela flaskan.

VI GRUBBLAR VIDARE i solen kring massan och inser att det knappast är effektivt att kyla hela den onödigt tunga flaskan. Här kommer aluminiumburken väl till pass. För vin blir det en annan situation, men, en plastpåse väger ju betydligt mindre än glas. Om det är en flaskas Dom Perignon som ska kylas kanske ni inte vill hålla över innehållet i en ziplock-påse, men annars är det ett rimligt alternativ. En stor del av värmen som du behöver transportera bort från flaskan är just för att kyla glaset, som dessutom leder värmen dåligt. Ett glas hållt i en påse som sänks ned i isvatten borde kylas på mindre än 2 minuter. Nu tillbaka till vår pilsner där vi alltså har fördel för burken som kyls snabbare än flaskan.

En flaskas vikt väger nästan 20 gånger mer än en burk. Massan för en burk är 16 gram

medan en typisk ölflaska har massan 307 gram för 33 cl. Det har givetvis betydelse för transporten, men påverkar såklart också hur lång tid det tar att kyla ner drycken. Den specifika värmekapaciteten för glas och aluminium är ungefär samma ($c_{\text{glas}} = 0,84 \text{ J/g/K}$ och $c_{\text{Al}} = 0,90 \text{ J/g/K}$). För att kyla en flaska öl från 25°C till 5°C behöver vi transportera bort: $(mc_{\text{öl}} + mc_{\text{glas}})\Delta T = (330 \cdot 4,18 + 307 \cdot 0,84) \cdot 20 = 33 \text{ kJ}$, medan det för burken endast behövs 28 kJ. Man kan givetvis utnyttja fysiken i det omvända fallet och se till att servera drycken i ett välkylt glas med hög termisk massa.

APROPÅ ATT SERVERA ÖLET: när vår öl nu är kall är det dags att hälla upp, och med upphållning kommer skumbildning. Formeringen av bubblor har flera likheter i öl och champagne och vi ska inte upprepa oss (se *Fysikaktuellt* nr 4/2023), men där finns också olikheter. Glaset som drycken serveras i ska givetvis vara väl rengjort och fuktigt på insidan för att få en fin skumbildning.

I Sverige hålls de flesta öl upp längs kanten på glaset. På tjeckiska kallas det sättet att servera öl fritt översatt för "*blöt hund*", och de fnysar åt metoden. Istället ska det bildas ett fint skum som påverkar både smaken och munkänslan, men som också skyddar så att koldioxiden (kolsyran) inte avdunstar så snabbt från ytan. Skummet bildas vid turbulent flöde som uppkommer antingen då drycken slår i glaset, eller i kulventilen på tappkranen när den inte är fullt öppen. Med rätt kran går det att kontrollera hur mycket skum som bildas och släpps ut, för att sedan öppna kranen helt och skapa ett laminärt flöde. Med kranöppningen placerad under skummet bildas sen inte mer skum och resten av koldioxiden bevaras.

MEDAN ÖLET HÄLLS UPP i glaset infin- ner sig en annan fundering. Varför rör sig bubblorna så annorlunda i en irländsk Guinness jämfört med en tjeckisk pilsner? Skummet i öl bildas vanligtvis av koldioxid, men använder man kväve bildas ett annat skum. Advektionen blir till exempel annorlunda när trycksättningen görs med olika gasblandningar och påverkar både smaken och munkänslan. Det är dock inte

lika lätt att lösa kväve i vätska som det är att lösa koldioxid. Det behövs därför betydligt högre tryck i tankarna eller burkarna. Olika gasers löslighet i vatten vid olika tryck är något som dykare är väl insatta i eftersom de vill undvika dykarsjuka som uppkommer om man stiger upp för fort efter ett djupt dyk. Men även en bartender som serverar öl har anledning att läsa på lite. För öl är det kanske framförallt hur lösligt koldioxid är i drycken (vi kommer tillbaka till kväve också). En burk eller flaska öl har 2–6 bars tryck vilket gör att det går att lösa mer koldioxid än vid normalt lufttryck. Jämför med champagne där trycket ibland kommer upp mot 8 bar, men där man också har kraftigare flaskor. När ölet öppnas sjunker trycket till 1 bar vilket gör vätskan övermättad och får koldioxiden att börja lämna drycken. Det sker på två olika sätt, dels genom avdunstning från ytan (om den inte är täckt av ett tjockt skum), dels i gränssytan till bubblorna som stiger upp mot ytan och där släpper ut gasen. Den lösta koldioxiden påverkar densiteten på vätskan och leder till en spännande dynamik när bubblorna stiger.

RADIEN FÖR EN BUBBLA som stiger uppåt i ett glas förväntas vid en första approximation att växa proportionellt med roten ur tiden. Bubblan blir större samtidigt som koncentrationen av koldioxid minskar runt bubblan (eftersom den nu istället är i bubblan). Detta minskar vätskans densitet, och får tyngre koldioxidmättad vätska att ersätta den. Därmed kommer det hela tiden att finnas koldioxidmättad vätska nära bubblan, vilket får den att växa fortare, och vi får vår skummande pilsner.

En Guinness Draught däremot har ett helt annat, mycket fylligare och krämigare skum med mindre bubblor, vilket beror på inblandning av kväve. Eftersom kväve är svårlost i vätska är gasinnehållet lägre, men trycket högre. I burken lagras kväve i en liten plastkula med små hål. När burken öppnas och trycket minskar frigörs kvävgasen och blandar sig med kolsyran. Storleken på bubblorna som bildas blir också betydligt mindre. Även om de också stiger mot ytan gör de det inte lika snabbt som större bubblor med bara koldioxid. Det är dessutom så att bubblorna faktiskt



Den ljusa lagern har högre densitet än den mörka stouten med kvävgas.

sjunker ute vid gränssytan till glaset. Sättet att få in kväve med högt tryck i burkarna är att droppa i en väl avvägd mängd flytande kväve i ölet precis när locket ska sättas på plats.

I VÅRT SISTA EXPERIMENT utnyttjar vi det faktum att gasen ändrar ölets densitet. En lageröl med koldioxid har högre densitet än en stout där vi löst in kvävgas. Vi borde alltså kunna skikta vätskorna i ett glas! Det blir extra effektivt eftersom de två ölsorterna har väldigt olika färg. Om vi dristar oss att fortsätta i humorns spår borde en stout med kvävgas alltså vara en "lätt-öl".

"Vi får hoppas att barna ändå får ett glas öl!"

Glad sommar, önskar

JOHAN MAURITSSON OCH MALIN SJÖÖ
Lunds universitet



Glada svenska deltagare på väg hem från NBPhO.

Rekordung segrare tog hem guldmedalj

Leshi Zhang från Danderyds gymnasium bärgade ett svenskt guld när den nordisk-baltiska fysikolympiaden avgjordes den sista helgen i april. Därmed plockade hon även hem första platsen i årets upplaga av **Wallenbergs fysikpris**. Och det är en rekordung segrare – Leshi har ännu inte fyllt 16 år!

Den nordisk-baltiska fysikolympiaden, NBPhO, är dels en tävling i sig, dels andra delen av finalen i Wallenbergs fysikpris. Därför var alla de svenska finalisterna inbjudna att åka till Tallinn i slutet av april för att under två dagar tävla i fysik. Förutom olympiadens ordinarie medlemsländer Estland, Finland, Lettland och Sverige deltog också gästande lag från Litauen, Brasilien, Saudiarabien, Georgien, Serbien och Vietnam och det totala antalet tävlande var över hundra.

I år blev det ett riktigt medaljregn över de svenska deltagarna: Förutom att

Leshi vann guld blev det silvermedaljer till Jiachen "Milly" Mi, Noa Torstensvik och Tor Lonnert samt bronsmedaljer till Ossian Wellmark, Erik Bengtsson, Allan Ismail, Dag Sochman och Yuqing Jiang. Resultatlistan toppades dock av fem (!) estländare med Mihkel Rannut som totalsegrare för andra året i rad.

Kanske kan den fina svenska framgången förklaras av att det i år bjudits på extra mycket träning inför olympiaden. Alla finalister har sedan i februari kunnat ta del av inspelade föreläsningar inom fysikområden som inte täcks tillräckligt av de svenska gymnasiekurserna, till

exempel termodynamik. Föreläsningarna, som hållits av tidigare tävlanden, har sedan följts upp av tips på lämpliga övningsuppgifter och ett efterföljande möte på distans där uppgifterna diskuterats. Oskar Vallhagen, som organiserat träningen, har all anledning att vara nöjd med upplägget!

Intressanta men krävande uppgifter på NBPhO

Varje tävlingsdag innehåller både teoretiska och experimentella uppgifter. Den första dagens experimentella problem gick ut på att lista ut vilken krets med tre dioder och en resistor som gömts i en



Eero Uustalu, ansvarig för de experimentella uppgifterna på NBPhO, visar några av deltagarna att det visst går att titta direkt på solen i ett teleskop – bara man har ett lämpligt filter.



27 april, kl 05.39: Nattpassets rättande avklarad för de svenska NBPhO-ledarna (från vänster) Mattias Bjerklov, Ellen Pelander och Melvin Storbacka.



FOTO: ANNE-SOFIE MÄRTENSSON

Leshi Zhang, rekordung svensk segrare i Wallenbergs fysikpris, vann även guld på NBPhO.

svart låda. Under den andra dagen var det istället svartkroppsstrålning och värmeledning som skulle bestämmas. Teoriuppgifterna innehöll bland annat frågor om hur många fåglar som kan sitta på en flytande balk utan att den börjar sjunka, hur man ska kasta en boll om den ska pricka en accelererande drönare och hur länge sedan det var som vår galax blev påkörd av den dvärggalax som orsakade stavstrukturen i dess centrala delar.

Under NBPhO arrangeras också en orienteringstävling med fysikuppgifter vid kontrollerna. Här har Sverige abonnerat på första platsen under många år och i år var det Dag Sochman som fullföljde traditionen och kunde komplettera sin bronsmedalj med en estnisk chokladkartong. Totalt knep de svenska deltagarna sju av de nio främsta platserna! Mer information om NBPhO inklusive tävlingsuppgifter, lösningsförslag och resultatlistor finns på olympiadens hemsida, nbpho.ee.

Göteborgsveckan och den experimentella finalen

NBPhO föregås av en träningsvecka i mitten av mars som fysikinstitutionerna på Chalmers och Göteborgs universitet arrangerar. Föreläsningar, träning på experimentell problemlösning och ett besök på Onsala rymdobservatorium finns med på programmet. Veckan innehåller även den experimentella delfinalen i Wallenbergs fysikpris. Tre uppgifter ska lösas, var och en under 80 minuter. I år gällde det att "Hålla sig i skinnen", och "På studs" svara ja på frågan "Vågar du?".

I skinnuppgiften skulle finalisterna

Tio i topp i Wallenbergs fysikpris

- 1 **Leshi Zhang**, Danderyds gymnasium
- 2 **Jiachen Mi**, Katedralskolan, Lund
- 3 **Noa Torstensvik**, Peder Skrivares skola, Varberg
- 4 **Tor Lonnert**, Polhemskolan, Lund
- 5 **Allan Ismail**, Katedralskolan, Växjö
- 6 **Erik Bengtsson**, Hvitfeldtska, Göteborg
- 7 **Dag Sochman**, Nacka Gymnasium
- 8 **Yujing Jiang**, Katedralskolan, Lund
- 9 **Ossian Wellmark**, GTG, Göteborg
- 10 **Max Bylund**, Hvitfeldtska, Göteborg

undersöka hur tjockt det strömförande skiktet är i en ståltrådsledare när växelströmmens frekvens varierar. Från dessa mätningar skulle även permeabiliteten för stål plockas fram. I studsuppgiften var det en pingisbolls stötta som skulle granskas, detta med hjälp av ett ljudredigeringsprogram som registrerade dunsarna när bollen slog i bordet. Stöttalet beror av vilken fart bollen har när den slår i eftersom den då deformeras olika mycket.

Våguppgiften anknöt till den stundande sommaren då vi kan se vågorna komma in mot en solig sandstrand och undra över varför de reser sig upp när de närmar sig stranden. Fenomenet med vattenvågor som slår över kan förklaras av att vågornas hastighet beror på vattendjupet. Men hur? Uppgiften gick ut på att bestämma just detta, undersöka förhållandet

mellan våghastighet och vattendjup för vågor som rör sig på grunt vatten. Utrustningen som fanns till hands bestod av en tumstock, ett tidtagarur, en hink full med vatten och en rejäl balkonglåda (utan jord och blommor). Och ja, det blev rätt blött på golvet efteråt! Uppgiftstexter, lösningsförslag och bedömningsanvisningar finns på www.fysikersamfundet.se/wallenbergs-fysikpris.

Nya olympiader i Sofia och Paris

Årets upplaga av Internationella fysikolympiaden, IPhO, arrangeras i Paris i juli. Det är de fem som nått de översta placeringarna i Wallenbergfinalen som erbjuds att representera Sverige här. Men redan i juni väntar ytterligare en olympiad, Europeiska fysikolympiaden, EuPhO, som i år äger rum i Bulgariens huvudstad Sofia. Här är det de fem elever som fick bäst resultat i uttagnings tävlingen som utgör det svenska laget.

Stort tack till alla som gör fysikveckan och NBPhO möjlig: föreläsare, provkonstruktörer, jurymedlemmar, Fysikcentrum i Göteborg, Stiftelsen Marcus och Amalia Wallenbergs Minnesfond och Skolverket. Och ett extra stort tack till de dygnet runt arbetande svenska ledarna under NBPhO som förutom att översätta och coacha laget även hjälpte till att rätta och moderera alla tävlandes lösningar: Adam Warnerbring, Ellen Pelander, Mattias Bjerklov och Melvin Storbacka.

ANNE-SOFIE MÄRTENSSON
Göteborgs universitet

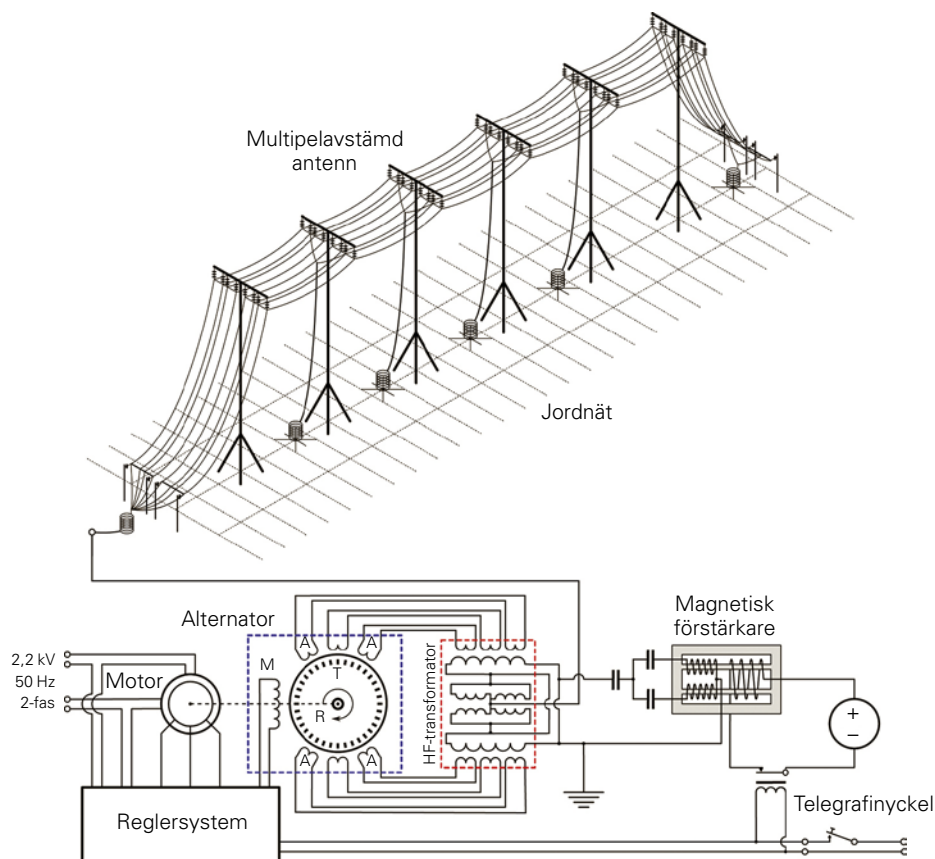


FOTO: JOAKIM JOHANSSON

FIGUR 1 Principschema för sändarstationen i Grimeton. De ikoniska antennstakarna (ovan) är väl synliga från E6:an öster om Varberg.

Världsarvet i Varberg

UNESCO:s världsarv förknippas kanske mest med antika monument, men visste du att bland de svenska världsarven finns den 100-årsjubilerande **radiostationen i Grimeton** utanför Varberg?

Vid sekelskiftet 1900 var långväga telekommunikation digital, där telegrafförbindelser genom undervattenskablar bildade globala nät, dominerade av stormakterna. Då, som nu, var undervattensinfrastruktur sårbar, och med erfarenheterna från första världskrigets isolering beslutade Sveriges riksdag 1920 att anslå medel till ett radiosystem för transatlantisk kommunikation.

För maritima behov fanns redan gnistsändare på lång- och mellanvåg, men dessa hade normalt måttlig räckvidd. Teorin för vågutbredning visade att signaldämpningen minskar med frekvensen, och för långa avstånd var "very low frequency", VLF-bandet (3–30 kHz), att föredra. Gnistsändare var dock mindre lämpade för det begränsade frekvens-

utrymmet på VLF, eftersom den dämpade vågformen ger ett väldigt brett spektrum. Sändartyper med hög effekt och kontinuerlig vågform var alltså önskvärda, och 1905 patenterade den svenskamerikanske ingenjören Ernst F. W. Alexanderson (1878–1975) en högfrekvensalternator. Denne exceptionellt produktive uppfinnare var verksam i General Electric (GE) och Radio Corporation of America (RCA) som dess chefsingenjör.

Tar man en jordglob och drar en linje från USA:s östkust till Sverige, finner man att området kring Varberg ger en storkvadrant som passerar nästan helt över hav. Närheten till det stabila växelströmsnätet från vattenkraftverken i Hallands åar var här också en fördel. 1922 påbörjades så bygget av en sändar-

station i Grimeton utanför Varberg samt en mottagarstation i Kungsbacka, med GE/RCA som leverantör av radiomateriellen. Radiostationen stod klar för drift i december 1924, och invigningen hölls 2 juli 1925 i närvaro av kung Gustaf V.

TEKNIKEN I GRIMETON RADIOSTATION är baserad på elektromekanik, och några av dess huvudkomponenter som visas i principalschemat i figur 1 beskrivs översiktligt i det följande.

Sändarens maskin utgörs av en 50 ton tung enhet med elmotor, växelåda och alternator. Motorn är en 375 kW asynkronmotor, och växelådan ger ett varvtal på 2115 rpm. Alternatorn har en rotor (R) i stål med en diameter på 1,6 m, och i dess periferi

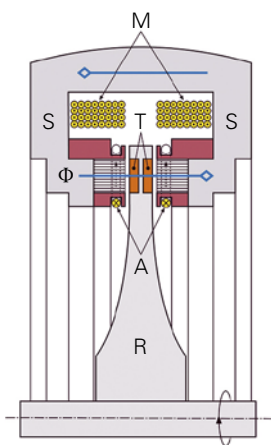
finns 488 tändar (T) som är fyllda med ickemagnetiskt material. Statorn (S) magnetiseras med en likströmslindning (M), och flödet i luftgapet (Φ) fås att pulsera när tändarna i rotorn passerar. Detta pulserande magnetfält inducerar en högfrekvent spänning i statorns 64 ankarlindningar (A), och i högfrekvensställverket kombineras dessa till ca 200 kW uteffekt. Frekvensen för sändaren ges av $488 \cdot 2 \cdot 115 / 60 = 17,2 \text{ kHz}$ (figur 2).

Högfrekvensställverkets transformatorer har en extra lindning som är kopplad till en magnetisk förstärkare. Denna komponent utgörs av en transformator med en högfrekvenslindning för vilken induktansen ändras när en likströmslindning mätar fältet i järnkärnan. Antennströmmen kan därmed moduleras genom att telegrafisignalen slår på och av likströmmen som då skiftar resonansfrekvensen i kretsen.

Anläggningen har även system för kylning, smörjning, styrning, mätning och skydd, samt ett sinnrikt reglersystem för att hålla frekvensen stabil oberoende av telegrafisignalens pulserande belastning på alternatorn och variationer i elnätets spänning och frekvens.

ANTENNSYSTEMET BESTÅR AV sex 127 m höga fristående torn (figur 3). Tornen ligger längs en linje med 380 m mellanrum, och antennens totala längd är alltså ca 2 km. I toppen sitter 46 m breda tvärbalkar som via isolatorer bär åtta topplinor vilka utgör en transmissionsledning. Själva antennfunktionen fås av sex vertikala ledningar som är anslutna till spolar vid vart och ett av tornen. Spolarna utgör tillsammans med topplinornas kapacitans till jord en svängningskrets med resonans på sändningsfrekvensen. Alexandersons uppfinning av den multipelavstämda antennen, där flera delantennerna samverkar, gör att verkningsgraden i Grimetons fall blir relativt hög, runt 10 %. Ett viktigt bidrag till verkningsgraden är jordningsnätet med ca 200 km kopparlina nedgrävd kringtornen.

Grimeton ingick i ett internationellt nät med navet i RCA:s Radio Central på Long Island, New York. 1936 överfördes 1,8 miljoner ord (ca 10 megabyte)



FIGUR 2 Till vänster: principskiss (tvärsnitt) för Alexanderson-alternatorn. Till höger: Grimetons alternator med högfrekvensställverket i bakgrunden.

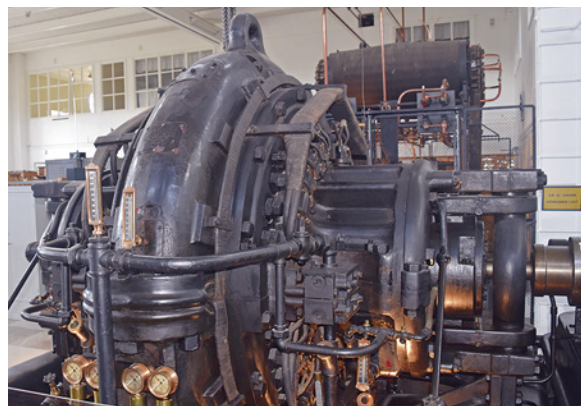


FOTO: JOAKIM JOHANSSON

från Grimeton, där priset per ord motsvarade timlönen för en industriarbetare. Sändningshastigheten var normalt 300 tecken per minut (50 bit/s). För en nutida betraktare kan detta verka lite, men det skall då jämföras med undervattenskablar som bara klarade ca 20 bit/s.

Förmågan att tillverka elektronrörsändare med allt högre effekt samt upptäckten att kortvågsbanden (3–30 MHz) kunde ge lång räckvidd, medförde att tekniken i Grimeton på sätt och vis redan var föråldrad när den byggdes. VLF-bandet hade dock fortsatt en viss fördel på grund av dess relativa oberoende av förhållandena i jonosfären.

UNDER ANDRA VÄRLDSKRIGET insåg man att kommunikation till ubåtar kan ske med hjälp av VLF-sändare, och i Sverige gjordes tidigt försök med Grimeton som sändare. Under kalla kriget kunde marinens långvågsstation utanför Oskarshamn täcka Östersjön, men på västkusten behövdes Grimeton. Med motivet nationell säkerhet kunde därmed Grimeton överleva till våra dagar.

Avvecklingen av telemonopolet kunde ha blivit slutet för Grimeton, men förståndiga chefer såg till att anläggningen underhölls. Stationsbyggnaden, ritad av Carl Åkerblad i nyklassisk stil, hade dessutom sådana värden att den blev byggnadsminne 1996, och 2003 flyttades radiostationen över till en stiftelse.

Motiverat av att den är unik som ett exceptionellt välbevarat förelektroniskt radiosystem, utsågs Grimeton radiostation



FOTO: ROLF BROBERG/WIKIMEDIA

FIGUR 3 Ett torn med sin vertikala antenneledning kopplad till spolen.

till världsarv av UNESCO 2 juli 2004. Sverige har därigenom åtagit sig att bevara radiostationen för kommande generationer. På Alexandersondagen (söndagen vid månadsskiftet juni/juli) och julaftons morgon startar man anläggningen och sänder ut ett meddelande i etern, och lyssnarrapporter brukar komma in från entusiaster över stora delar av världen.

Om du är teknikhistoriskt intresserad så är Grimeton (grimeton.org) väl värt ett besök!

JOAKIM JOHANSSON

Docent, sekreterare i Svenska nationalkommittén för radiovetenskap (SNRV)

Kvantfysikens gränser

Gränsskikt mellan olika material, eller mellan olika faser av samma material, är intressanta av flera anledningar. Bland annat kan effekter som uppstår i gränsskikt mellan material förenkla **beräkningar i kvantdatorer**.

I tillämpningar kan kommunikation över en gräns vara det som är användbart. Men det kan också vara så att yttre påverkan sipprar in genom gränsskiktet och förstör något innanför som är bräckligt. Teoretiska modeller kan hjälpa fysiker att förstå. Det är också av intresse att utforska vad som kan hända om två kända modeller förs i kontakt via ett gränsskikt.

Elektronen, magnetism och en berömd katt

Elektronen är som en liten kompassnål, som kan peka upp eller ned: den magnetiska egenskapen kallas *spinn*. Det är elektronens spinn som orsakar magnetismen i en vanlig kylskåpsmagnet. Innan vi mätt åt vilket håll elektronens magnetiska axel pekar är den enligt kvantfysik i *superposition* (överlagring) av de två ömsesidigt uteslutande tillstånden spinn upp och spinn ned. Det är som Schrödingers katt, som ibland påstås vara samtidigt död och levande.

Men ordet "och" är här bara ett tafatt försök att beskriva kvantfysisk superposition. Vid mätning måste partikeln

finna sig i ett av de två tillstånden: de är ömsesidigt uteslutande. Innan mätning är tillståndet däremot obestämt, enligt kvantfysik. Men vad betyder det? Huruvida obestämda tillstånd ens "existerar" i vanlig bemärkelse tänjer på gränsen av vad dagens kvantfysik-teorier ägnar sig åt att besvara. Frågor vad som "egentligen existerar" lämnar många fysiker gärna åt filosofer, men personligen tycker jag det är intressant. Det är den andra betydelsen i den här artikels titel.

När fysiken börjar gränsa till filosofi, kan det vara användbart till något? Ja, till exempel kan många elektroner i snärjda (*entangled*) superpositioner användas som kvantbitar i kvantdatorer. Det är den nya sorts superdatorer som just nu byggs bland annat på Googles kvant-AI-labb i Kalifornien, vid Wallenberg-centrat på Chalmers (läs mer i *Fysikaktuellt* nr 1/2024), och i Kina. Att två elektroner är snärjda innebär att det finns ett kvantfysiskt samband mellan mätutfallet för den ena elektronen och mätutfallet för den andra, trots att de kan befinna sig långt ifrån varandra. I exemplet i fak-

tarutan nedan är alla tillstånd med bestämd energi faktiskt snärjda, så det är "normalfallet": snärjelse är naturligt. Hur snärjelse produceras i laboratorier diskuteras bland annat i *Fysikaktuellt*-artikeln om Nobelpriset 2022: två elektroner kan spontant sänka sin gemensamma energi genom att avge en foton.

Elektroner som "vätska"

Valenselektroner i metall vid rumstemperatur kan röra sig fritt utesluttet av positiva joner de lämnar efter sig. Redan 1926 beskrev Enrico Fermi de elektronerna ungefär som molekyler som rör sig i vanlig luft (läs mer i Annica Black-Schaffers text "*Kvantfysik i material*" i *Kosmos* 2017). Den viktiga skillnaden mellan elektroner i metall och molekyler i luft är att elektronerna rör sig utesluttet, medan luftmolekylerna ju rör sig i tomrum. När man kyler tillräckligt, för aluminium ned till ca 4 K, gör växelverkan med gittret att "gasen" av elektroner kondenserar till något som man kan kalla "vätska". Aluminiumet som helhet kvarstår som fast ämne. Det som kon-

Matematiken bakom Ising-modellen

I kvantfysik är det energi-matrisen (Hamilton-operatorn) H som låter oss beräkna ett systems möjliga energier: de är matrisens *egenvärden*. (Egenvärden E_i för en 4×4 -matris A definieras som $A v_i = E_i v_i$ där $i = 1, 2, 3, 4$, för fyra egenvektorer v_i). För ett endimensionellt gitter med $N = 2$ platser är ett exempel på Ising-modellen följande:

$$H = -J X_1 \otimes X_2 - h Z_1 \otimes \mathbb{I} - h \mathbb{I} \otimes Z_2 =$$

$$\begin{pmatrix} -2h & 0 & 0 & -J \\ 0 & 0 & -J & 0 \\ 0 & -J & 0 & 0 \\ -J & 0 & 0 & 2h \end{pmatrix}$$

Här är X och Z Pauli-matriser, J är energin som motsvarar kraft mellan kvantbitarna, och h är ett externt magnetfält. Produkterna $\otimes$ är inte matrismultiplikationer (som skulle ge 2×2 -matriser), utan *tensor-produkter*, som ger 4×4 -matriser. Om det ser trassligt ut: bra! Snart blir det lite lättare.

Till exempel, med $J = 1$ meV, $h = 1/2$ meV får vi energierna $-\sqrt{2}$, -1 , 1 , och $\sqrt{2}$ meV. Negativ energi betyder relativt en nollpunkt. Alla egentillstånd är snärjda (sammanflätat, *entangled*), vilket är viktigt.

Poängen i den här artikeln är att det går att skriva om matrisen H ovan med vanlig matrismultiplikation för fyra 4×4 -matriser (omskrivningen kallas Jordan-Wigner-transformation):

$$H/i = J f_2 f_3 + h f_1 f_2 + h f_3 f_4 = \sum_{i,j} K_{ij} f_i f_j$$

där $i = \sqrt{-1}$. De fyra matriserna f_i har bara fyra nollskilda element var (konventionellt innehåller de imaginära enheten i , så H själv är reell). Den ordning man multiplicerar ihop dem i ändrar tecknet, till exempel $f_1 f_2 = -f_2 f_1$, som diskuteras i texten. Notera att internkraft-termen med J och externkraft-(fält)-termerna med h är mer lika varandra än i H ovan. Vi kan fånga all information i H med en ny enhetlig matris K , som plockar ut koefficienterna för f_i i uttrycket för H ovan.

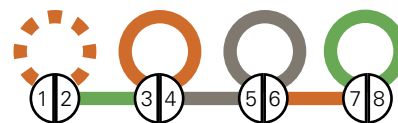
För mer detaljer i den här beräkningen, se min hemsida:
<https://tp.hotell.kau.se/marcus/outreach>



FIGUR 1 Fyra halv-elektroner. Orange = h , grön = J .



FIGUR 2 Kopplingarna i figur 1 har rätats ut.



FIGUR 4 De grå kopplingarna utgör gränsskiktet. Ser du spegelsymmetrin, och varför vi måste ta bort den streckade kopplingen?

denserar fram är alltså inte någon vanlig vätska som man kan hålla upp i ett glas, utan en kollektiv beskrivning av stora mängder elektroner som en super-vätska (supravätska) av elektricitet. Den vätskan visar sig kunna passera obehindrat genom gittret av joner, vilket kallas supraledning, ledning av ström med noll resistans, 0Ω .

Två kvantbitar, intern och extern kraft

En av de enklaste kvantfysik-modeller som finns är Ising-modellen för två kvantspinn (kvant-bitar), som befinner sig på två olika gitter-platser: 1 och 2. Det finns en *intern* kraft mellan kvant-bitarna, som vi inte kan kontrollera utifrån, som tenderar att likrikta dem: det kostar energi J för dem att peka åt olika håll. Det finns också *extern* kraft på kvant-bitarna, från ett magnetfält som vi slår på för hand i laboratoriet. Elektronerna beter sig ju som små kompassnålar: de ställer in sig efter magnetfält, om det är starkt nog. Om spinnets pekare mot det fältet kostar det energi h . För $h < J$ beskriver modellen en magnet av samma sort som järn (*ferromagnet*), där kraft mellan spinnen kan ge en permanent magnetisering. För $h > J$ är det som för många andra grundämnen, att de i och för sig kan magnetiseras, men det försvinner när man slår av magnetfältet (*paramagnet*). Överraskande nog finns det en relation mellan de två till synes helt olika situationerna: det finns ett sätt att byta ut J och h som ger en relaterad dual beskrivning av fysiken, Kramers-Wannier-dualitet.

Den dualiteten framträder lite tydligare om vi skriver om modellen med hjälp av fyra matriser f_i (som i faktarutan).



FIGUR 3 Kinesiskt kvantdatorchip med 100 kvantbitar. De sitter på en yta, men är kopplade "i en linje", som figurerna i den här artikeln.

Multiplicerar vi till exempel f_1 och f_3 i motsatt ordning, det vill säga byter plats på två elektroner, är matriserna sådana att den omvända matrismultiplikationen ger ett viktigt minustecken.¹ Partiklar som ger ett minustecken när man byter plats på dem kallas "fermioner" efter ovan nämnde Enrico Fermi. Det minustecknet är anledningen till att Pauli-principen i periodiska systemet gäller: elektroner kan inte vara fler än en i samma tillstånd. Om man försöker byta plats på två elektroner som är på *samma* plats, så blir det tillståndet minus sig självt. Det enda talet som är minus sig självt är noll. Så elektroner kan inte vara på samma plats.

Nu framträder vad som verkar vara en paradox, med en dramatisk lösning. Elektronen är en elementarpartikel. Men i faktarutan ser det ut som två "byggstenar" per ursprunglig gitter-plats: f_1 och f_2 befinner sig på plats 1, medan plats 2 befolkas av f_3 och f_4 . Varje f_i beskriver en *halv* elektron! Det leder inte självklart till slutsatsen att halvorna är fysiskt uppdelade, men elektronen känner på något sätt av intern och extern kraft på två olika sätt, så energimässigt har elektroner två "avatarer", som vanligtvis befinner sig på samma plats.

I fermion-beskrivningen är intern och extern kraft mer likaberättigade:

h kopplar fermion 1 och 2 (bägge på plats 1) samt 3 och 4 (bägge på plats 2), ritat som böjda kopplingar i orange i figur 1, medan J kopplar fermion 2 och 3 (från plats 1 till plats 2), ritat i grönt. Vi skulle abstrakt kunna "räta ut" även h -kopplingarna, som i figur 2. Då blir likaberättigandet mellan de två färgerna tydligare. I figur 2 ser det ut som om halv-elektronerna är fysiskt separerade.

Att tänja elektronen till sin gräns

Det finns experiment som påstår att det under vissa omständigheter faktiskt går att separera halvorna: när man har ett *gränsskikt* mellan två olika rader av elektroner. I skrivande stund publicerades en artikel där ett nytt kinesiskt kvantdatorchip används för separeringen vid en gräns (figur 3).

I vår grupp i Karlstad, med doktoranden Juliane Graf i spetsen, försöker vi hitta en så enkel teoretisk modell av gränsskikt vi kan. Vi kopplar därför ihop våra två elektroner med en tredje elektron, vars koppling till elektron nummer två (4–5) och själv-koppling (5–6) representerar gränsskiktet, i grått i figur 4. Vi tar till sist en fjärde elektron (7–8), som representerar "andra sidan" gränsen. Då uppträder en "spegelsymmetri", om man byter gröna och orange kopplingar i figur 4. Det fungerar bara om vi slår av magnetfältet på plats 1, därför är det streckat i figur 4. (Tips: det är lättare att se symmetrin om du tänker dig figur 4 utsträckt, som figur 2). En sådan spegelsymmetri leder teoretiskt till förhöjd robusthet i systemet, som är eftertraktat i de annars ack så bräckliga kvanttillstånden. Vi tror att det kanske går att testa den här typen av teoretisk modell i experiment, där man först har de två sidorna separata, sedan kopplar dem.

Vad tjänar allt det här till? Det jag ►

¹ För experter: stegoperatorerna är $\sigma_i^\pm = (f_1 \pm if_2)/2$, där f_i är Majorana.

► kallade ”intern kraft” ovan gör det extremt komplicerat att räkna ut energier för större system (till exempel 100 kvantbitar, som i figur 3), eftersom varje partikel tillstånd påverkar sin grannes energi. För 100 elektroner blir motsvarande H-matris (se faktarutan) $2^{100} \times 2^{100}$, som inte ens går att lagra på en superdator, än mindre räkna med. En avsevärd styrka hos fermion-formuleringen av kvantbitar är att den interna kraften är *inbyggd i Pauli-principen*. Det går därför att betrakta systemet som att det enbart finns extern kraft – att varje partikel i en viss bemärkelse kan beskrivas separat, oberoende av de andra. Koefficient-matrisen K i faktarutan är bara 200×200 i det fallet. Så en beräkning som inte ens går att utföra på världens största superdator (räkna med $2^{100} \times 2^{100}$ -matris) kan man efter Jordan-Wigner-transformationen utföra på en vanlig bärbar dator på under en sekund. Det kan ge nya sätt att testa kvantdator-beräkningar, i vissa fall.

Här är ett exempel. Om vi räknar ut energin i grundtillståndet i milli-elektronvolt direkt från fermion-beskrivningen, med samma värden som i rutan på föregående uppslag, får vi

$$-\frac{1}{2}\sqrt{3-2\sqrt{2}} - \frac{1}{2}\sqrt{3+2\sqrt{2}}$$

som är lika med $-\sqrt{2}$ meV (testa gärna själv med miniräknare!). Det stämmer med energin vi fick i rutan från direkt beräkning. Fermion-beskrivningen ger svar som ser lite mer tillknycklade ut. Men de går åtminstone att räkna ut för 100 kvantbitar, som börjar bli verklighet redan i dagens kvantdatorer.

MARCUS BERG

professor, Karlstads universitet

Läs mer

F.Jin et al, *Observation of topological prethermal strong zero modes* (2025), <https://arxiv.org/abs/2501.04688>

J.Graf et al, *The Ising dual-reflection interface: Z_4 symmetry, Majorana strong zero modes, and SPT phases* (2024), <https://arxiv.org/abs/2412.06377>



Forskarfredag 2023 på Curiosity i Umeå.

Från doktorand till "TV-fysiker"

Jag har under 30 års tid sysslat med **populärvetenskap**. Den fråga som texten nedan försöker besvara är varför jag håller på med denna ovanliga sysselsättning.

Det som sätter igång det hela för mig utspelar sig den 12 november 1993 klockan 19.00 i Aula Nordia på Umeå universitet. Den stora aulan är nästan fullsatt med fysiker i samband med Fysikdagarna. På scenen står fysikläraren Hans-Uno Bengtsson från Lund och ger en show där han ligger på spikmatta samtidigt som ett cementblock på bröstet krossas av en slägga. Han stoppar handen i flytande kväve och slår söder djupfrysta äpplen, och liknar sig själv vid fysikens Indiana Jones. Allt görs med humor, pedagogiska förklaringar och häftiga fysikexperiment. I publiken sitter jag, en nybliven doktorand i rymdfysik, och

imponeras. I precis denna stund tänker jag: *Det där vill jag göra! Jag vill också uppträda med fysik och visa hur coolt det är.*

Ganska precis ett år senare, i december 1994, åker jag till Ursvikens högstadium utanför Skellefteå och håller min allra första populärvetenskapliga föreläsning. Den handlar om norrsken, och jag beskriver detta för eleverna som en äventyrsberättelse om elektronen Hugos fantastiska resa från solen tills han blir en norrskenselectron. Elevernas positiva reaktioner och den egna känslan att jag faktiskt är ganska bra på detta, gör att jag utan tvekan tar på mig nya liknade uppdrag. Men det är först i januari 1996 som

jag på allvar inser att detta är min passion. Jag blir inbjuden att föreläsa i sambanden med en så kallad *Tjejbelg*, ett evenemang arrangerat av fysikinstitutionen i Umeå med målet att få fler kvinnliga studenter att intressera sig för fysik. Jag skapar en föreläsning där jag kombinerar universums geografi med en föreläsning om Big Bang, och kryddar allt med lite humor. Mitt under föreläsningen känner jag plötsligt, "Fan va bra det här är!" Då jag går ut ur klassrummet känner jag mig nästan hög av upplevelsen, en känsla jag vill uppleva igen!

Den helgen är även en annan föreläsare inbjuden, Hans-Uno Bengtsson. Jag tittar på hans show, och ser bland annat hur en av tjejerna i publiken svimmar då Hans-Uno i hemlighet stoppat en prinskorv i en plasthandske där hans pekfinger borde vara. Han stoppar ner "fingret" i flytande kväve i en halvminut innan han med en hammare slår på "fingret" som krossas och bitar flyger ut genom den trasiga handsken. Den avsvimmade tjejen vaknade snart till liv och Hans-Uno får dånande applåder. Några dagar senare får jag läsa utvärderingen av helgen. Både Hans-Uno och jag höjs till skyarna, många skriver att vi var lika fantastiskt bra. Det är stort för mig. Det finns tydligen de som tycker att lilla jag var lika bra som Hans-Uno, min fysikgud. Jag inser då att detta verkligen är min grej. Även om jag aldrig riktigt upplevt samma känsla som första gången jag fick rungande applåder så känner jag ofta en genuin uppskattning från publiken. Det är uppenbart för mig att publikens respons är mycket starkt bidragande till att jag orkar fortsätta med föreläsningarna år efter år.

EN ANNAN VIKTIGT HÄNDELSE för mig som populärvetenskaplig föreläsare sker under 2004. Då skriver min kollega Maria Hamrin och jag en bok – *Fysik i vardagen* – som bygger på ett kompendium vi utvecklat för en sommarkurs. Boken, som innehåller över 350 olika vardagsfenomen, tryckts våren 2005 och blir mot alla odds en stor försäljningsframgång. Material i boken har jag senare använt i hundratals olika populärvetenskapliga evenemang och det händer fortfarande att



Blandade uppdrag uppifrån och ner: Fråga Lund (2020), Barnprogrammet "Maxat" (2021) och Forskarfredag (2021).

jag bläddrar i den då jag letar efter inspiration till nya föreläsningar.

2005 ÄR FYSIKDAGARNA ÅTER i Umeå. Jag får tillsammans med min kollega Krister Wiklund i uppdrag att skapa en föreläsning om Hollywoodfysik. I denna visar vi actionscener från kända biofilmer. Vi varvar detta med förklaringar varför scenerna

bryter mot fysikens lagar och visar egna filmer där vi fysikaliskt korrekt återskapar scener ur filmerna. Föreläsningen blir en stor framgång och vi kontaktas bland annat av SVT, TV4, Dagens nyheter och Aftonbladet som gör reportage om detta. 2007 gör vi tio inslag på lokal-tv med titeln: *Actionfysikerna Krille och Putte*.

DEN 5 JUNI 2007 klockan 11.06.48 får jag e-post. Det är en förfrågan om jag vill vara med som fysikexpert i en ny tv-produktion med arbetsnamnet *Einstein and the E Street band*. Programmet påminner om klassiska *Fråga Lund* med Filip Hammar och Fredrik Wikingsson som programledare. Jag tackar ja, utan att fundera mer än ett par minuter på saken. Programmet, som kommer att kallas *Boston Tea Party*, blir för mig en möjlighet att förklara spännande fysikfenomen för en bredare allmänhet. Programmet sänds i tre säsonger och jag medverkar i samtliga 26 avsnitt. Detta gör också att jag får många andra mediala förfrågningar, allt från barnprogram till rena underhållningsprogram. Än idag dyker nya spännande förfrågningar upp!

Detta är helt kort vad som lett fram till att jag ägnar så mycket tid åt populärvetenskap. Det har under åren varit en balans mellan att bara köra på med ett eller två säkra kort, eller försöka utveckla nya föreläsningar. Jag har med åren insett att de nya föreläsningarna mest behövs för att jag själv ska få stimulans, men att de saker som var populära för skolbarn för 20 år sedan är lika spännande för dagens skolungdomar. Så mina tidiga "hits" om vardagsfysik, Big Bang och Hollywoodfysik är fortfarande de mest populära och de som jag fortfarande ger omkring tio gånger varje år.

Vad är då mitt tips om någon vill ägna sig åt denna udda sysselsättning? Hitta något som ni själva tycker är intressant och spännande, och se till att förklara det begripligt utan att förklaringen blir allt för felaktig. Bli inte långgrandig, och försök gärna få in lite humor. Lyssna på reaktionerna, behåll det som går hem, och förbättra det övriga till nästa gång. Lycka till!

PATRIK NORQVIST

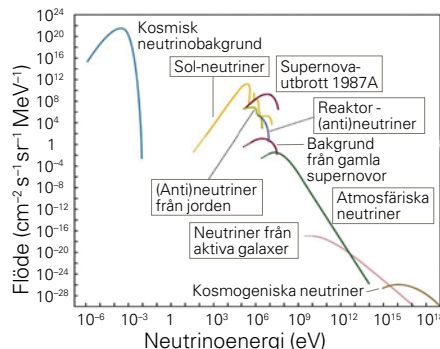
Föreläsare och lektor i rymdfysik,
Umeå universitet

Kosmologins svåraste mätning?

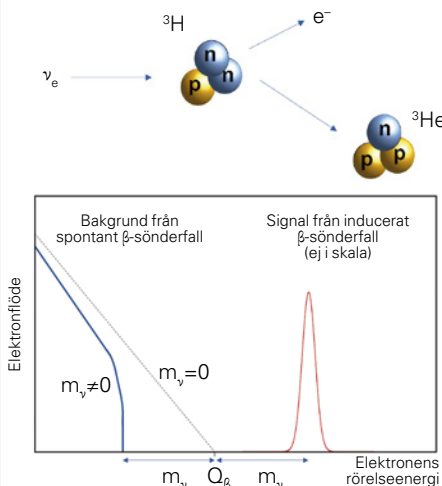
Att titta på universum när det var en sekund gammalt kan verka som en omöjlig uppgift, men detta är vad **PTOLEMY**, ett samarbete mellan femtio forskare från sju länder, har som mål.

Enligt big bang-teorin frikopplades en mängd neutriner från den omgivande materien när universum var ungefär en sekund gammalt. PTOLEMY syftar till att upptäcka dessa så kallade relikneutriner, som alltså har strömmat fritt sedan dess. Neutriner är lätta, elektriskt neutrala och extremt svagt växelverkande elementarpartiklar. Ändå har de viktiga konsekvenser inom kosmologi. Det allomfattande flödet av relikneutriner, den kosmiska neutrino bakgrunden (CNB på engelska), är fortfarande med oss. Att experimentellt påvisa den kommer att ge oss en inblick i universum när det bara var en sekund gammalt.

Det tidiga universum är ett mycket intressant fysiklaboratorium: ett snabbt expanderande hett plasma av elementarpartiklar som växelverkar genom de fundamentala krafterna. Tyvärr är det endast tillgängligt för oss på det mest indirekta sättet, genom astrofysiska observationer 13 miljarder år senare. En nyckelmätning som hjälpte till att etablera synen på det tidiga universum som just ett hett expanderande plasma var upptäckten av den kosmiska bakgrundsstrålningen (CMB på engelska) 1964 av Arno Penzias och Robert Wilson. CMB är den relikta fotonstrålningen från big bang. Det handlar om fotoner som emitterades när det ursprungliga elementarpartikelplasma hade svalnat till en temperatur där de första atomerna hade bildats. Den omgivande strålningen hade då inte längre tillräcklig energi för att jonisera dem. Från den tidpunkten, ungefär 380 000 år efter big bang, kan fotoner flöda fritt. Idag har CMB-fotonerna en energifördelning av en



FIGUR 1 Flödet av neutriner på jorden, från olika källor, som en funktion av neutrinoenergin. Neutriner från de inramade källorna har redan detekterats med olika tekniker. PTOLEMY:S största utmaning är den extremt låga energin i den kosmiska neutrino bakgrunden, vilket är en teknisk utmaning. Problemet med att detektera neutriner med den högsta energin är istället det extremt låga flödet, vilket är en utmaning för detektorstorleken.

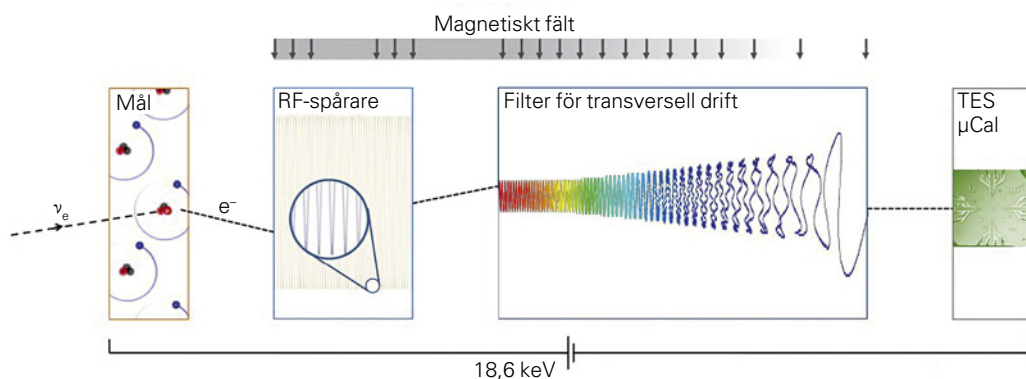


FIGUR 2 Överst: omvänt (inducerat) tritium β -sönderfall. Underst: elektronenergi från inducerat β -sönderfall (röd kurva) jämfört med slutpunkten för det spontana β -sönderfallet av tritium.

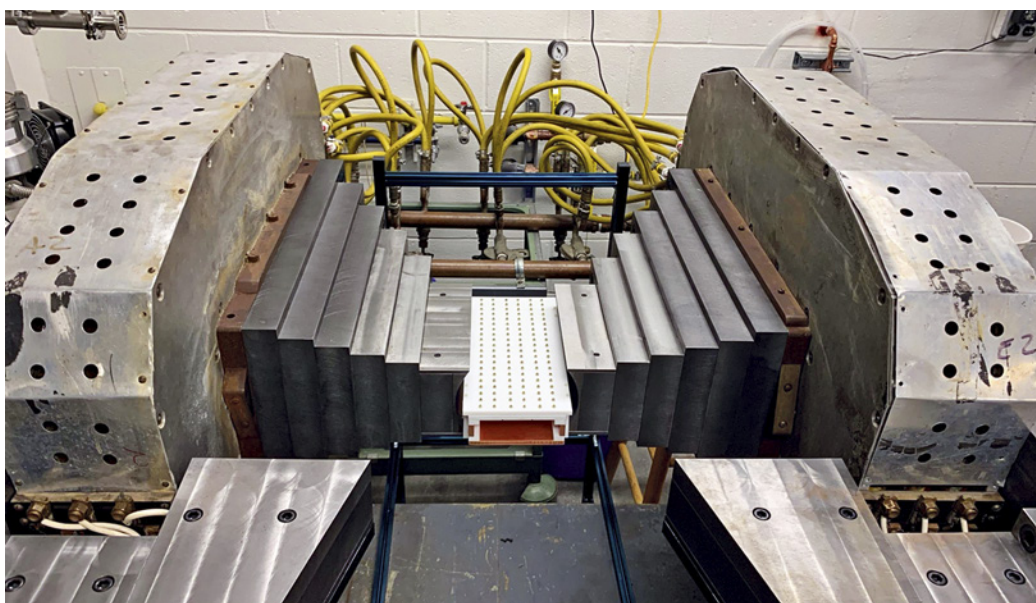
perfekt svartkropp med en temperatur på 2,73 K, vilket motsvarar en toppenergi på millielektronvoltnivå. Som jämförelse har synligt ljus en energi i storleksordningen tusen gånger högre. Studiet av detaljerna i CMB har gett oss en enorm mängd information om universums utveckling och struktur.

EN LIKNANDE PROCESS SKER för neutriner. Men eftersom de växelverkar genom den svaga kärnkraften, slutade de att interagera med omgivningen mycket tidigare än fotoner och frikopplades från det heta, expanderande plasma bara en sekund efter big bang. Big bang-modellens förutsägelse är att det idag borde finnas en allomfattande gas av relikneutriner med en svartkroppstemperatur på 1,96 K, vilket motsvarar en toppenergi på cirka 10^{-4} eV (figur 1). Modellen förutspår en densitet på ungefär 300 neutriner per cm^3 (inklusive deras antipartiklar) överallt, inklusive rummet där du just nu läser detta. Men även om relikneutriner hade en typisk energi på megaelektronvolt när de frikopplades från det ursprungliga plasma, har den efterföljande expansionen av universum sänkt deras energi till en bråkdel av millielektronvolt nu. Upptäckten av ett sådant flöde skulle alltså kunna ge oss mängder av information om universums tillstånd när det var en sekund gammalt. Vem kan motstå att försöka?

Huvudidén i PTOLEMY-projektet är att använda atomärt tritium (^3H) som mål för att absorbera CNB-neutriner av elektron-typ. Detta ska ske genom att man utnyttjar den omvända betasönderfallsprocessen, där $\bar{\nu}_e + ^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + e^-$. Den



FIGUR 3
Detektorprincipen
för PTOLEMY.



FIGUR 4 En prototyp av
magneten till detektorn
under konstruktion.

emitterade elektronen har en bestämd energi vid dubbla neutrinomassan från slutpunkten av det (mycket mer rikliga) spontana ^3H -betasönderfallet (figur 2). För att mäta detta gap behövs en elektronenergiupplösning på millielektronvoltnivå, så att bakgrunden av elektroner som uppstår från vanligt tritiumbetasönderfall kan minskas till mindre än en per år. Detta är en av utmaningarna för PTOLEMY.

FÖR ATT VÄLJA UT elektroner som kastas ut från den omvända betaprocessen med den "rätta" energin kommer ett dynamiskt elektromagnetiskt filter att användas (figur 3). Ett område med konstant magnetfält kommer att tvinga in elektronerna i cirkulära banor där deras energi kommer att mätas av en radiofrekvensantenn. Elektroner med en energi nära tritiums beta-slutpunkt kommer att matas in

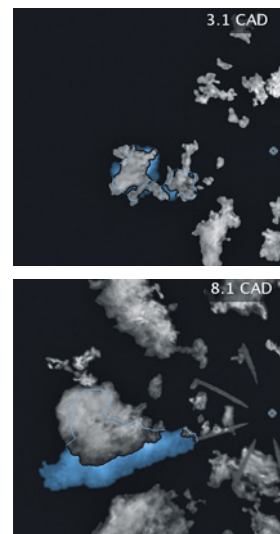
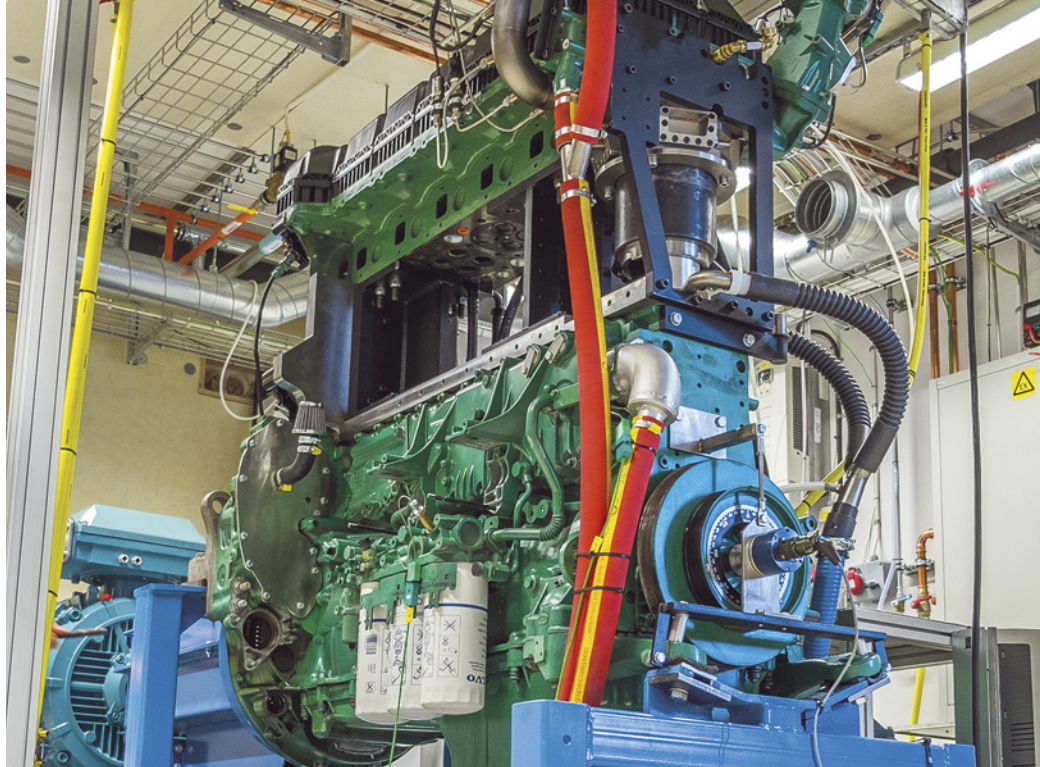
i en selektor baserad på en kombination av elektriska och magnetiska fält. Där fokuseras elektronerna in i en mikrokalorimeter för en slutlig, precis energimätning. Kalorimetern kommer att använda teknik med övergångskantsensorer (TES) med en energiupplösning på mindre än 50 millielektronvolt. Figur 3 visar en schematisk bild av detektorprincipen, och figur 4 en prototyp av magneten under konstruktion.

DEN ANDRA UTMANINGEN är målet. Tvärsnittet för infångning av elektron-neutrinos på ^3H är cirka 10^{-44} cm^2 , och PTOLEMY behöver 100 gram tritium för att upptäcka cirka 10 CNB-neutriner per år. Dessutom måste målet vara extremt tunt för att undvika utsmetning av elektronenergin, vilket skulle försämra detektorns prestanda. När den här artikeln

skrivs undersöks möjligheten att använda ett mål bestående av monoatomiska lager av grafen med kemiskt bundna ^3H -atomer.

PTOLEMY är ett radikalt nytt tillvägagångssätt för att upptäcka CNB, och mycket teknik behöver fortfarande utvecklas för att nå den nödvändiga energikänsligheten. För närvarande byggs en demonstrator vid Laboratori Nazionali del Gran Sasso i Italien. En komplett detektor förväntas vara klar i slutet av decenniet, och den första fysikuppgiften för att fastställa dess prestanda kommer att vara mätningen av massan hos elektron-neutrion genom en precis mätning av slutpunkten för tritiumbetasönderfallet med $10 \text{ mg } ^3\text{H}$.

CARLOS PÉREZ DE LOS HEROS
Professor, Institutionen för fysik och
astronomi, Uppsala universitet



Till vänster den optiska motorn på Lunds universitet. Bilderna ovan visar exempel från lasermätningar där grått är emission från flammen och blått är fördelningen av formaldehyd.

Ett fönster mot förbränningen

För att kunna förbättra något, till exempel en motor, behöver vi förstå hur den fungerar. Med hjälp av en så kallad **optisk motor** kan forskare se in i en förbränningsmotor under drift, och därmed studera processerna i realtid.

Världen är full av motorer. Det finns en mängd olika typer, men låt oss fokusera på en av de absolut vanligaste, kolvmotorn. Vi hittar dem i varierande storlek i allt från gräsklippare och motorsågar till mopeder, bilar, jordbruksmaskiner, fartyg och kraftverk. Listan över applikationer där kolvmotorer möjliggör tunga arbeten, eller bara förenklar vardagen, kan uppenbarligen göras lång. För de flesta av oss är dessa motorer helt avgörande för de transporter vi nyttjar dagligen.

Utan att gå in i detalj på historieskrivningen kan vi konstatera att förlagorna till de numera dominerande bensin- och dieselmotorerna lanserades i slutet av 1800-talet. Inte sällan framförs kritik över att kolvmotorer är ålderdomliga och

”har sett likadana ut i över 100 år”. Som vanligt är sanningen en aning mer nyanserad än så, och ur ett teknikperspektiv har motorutvecklingen tveklöst gjort fantastiska framsteg. Det är svårt att inte låta sig imponeras av att en modern dieselmotor kan förflytta 1 500 kg familjebil 1 km i 60 km/h på den bränslemängd som ryms i ett knappt fullt snapsglas. Hur har då detta kontinuerliga utvecklingsarbete gått till, och hur går det till när nästa generations motorer designas?

SOM INDIKERATS OVAN har verkningsgraden förbättrats radikalt under kolvmotorns mer än 100-åriga historia. Det samma gäller mängden skadliga utsläpp i avgaserna. Behovet av att minska utsläppen av koldioxid gör att de fossila bräns-

lena i framtiden måste fasas ut och ersättas med hållbara alternativ. Men även med nya, förnyelsebara bränslen kommer det att krävas ytterligare förbättring av verkningsgrad och emissionsnivåer. Historiskt sett har mycket av utvecklingsarbetet skett genom traditionellt ingenjörsarbete. Genom att komplettera teorin med omfattande experiment och tester har man gradvis ökat förståelsen för processerna inne i motorn, vilket är grunden för all vidareutveckling. Man måste förstå vad som händer för att kunna förbättra något!

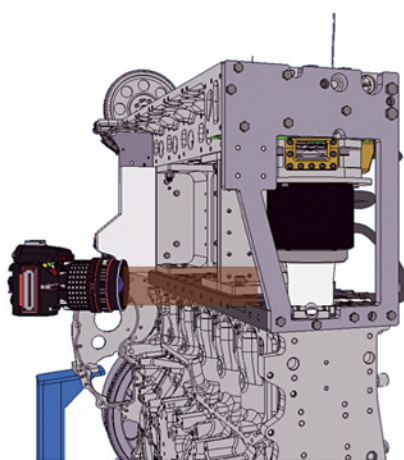
I grunden sker teknikutvecklingen på liknande sätt idag, men verktygen har naturligtvis förändrats. Datorsimuleringar har till exempel fått en framträdande roll, inte minst för att de kan vara snabbare och

billigare än fysiska experiment. Behovet av att förstå och verifiera vad som händer inne i motorn kvarstår dock. På grund av motorns natur har vi här en enorm utmaning. Det mesta sker så att säga i slutrum. När luft och bränsle sprutats in, stängs alla ventiler och det blir omöjligt att se vad som faktiskt händer. Storheter som tryck och temperatur kan man mäta med små sensorer, men möjligheten att faktiskt se var och hur det strömmar, blandas, antänds och brinner är väldigt begränsad ... om man inte har tillgång till "optiska motorer".

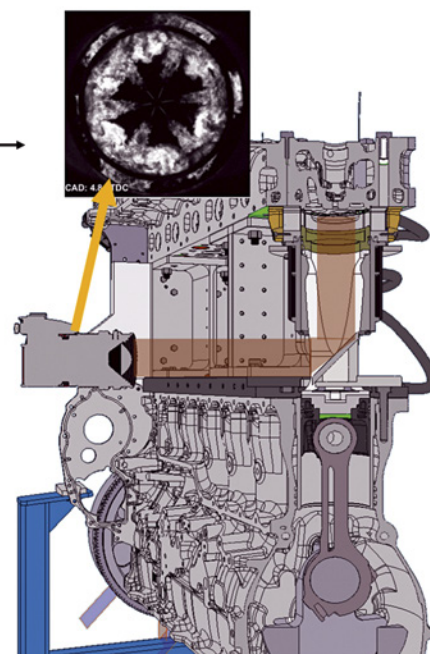
I EN OPTISK MOTOR kan man göra just det, nämligen se och filma vad som faktiskt händer inne i förbränningsrummet när motorn är i drift. Hur åstadkommer man detta? Förenklat kan man säga att man tar upp håll i motorn på lämpliga ställen och täcker dessa med glas. Genom dessa fönster kan de olika processerna sedan studeras i realtid, oftast med hjälp av sofistikerade tekniker såsom laserbaserad diagnostik eller höghastighetsfilmning. Det ska sägas att glas, eller kvarts som det oftast är frågan om, inte är det bästa konstruktionsmaterialet för motorer, men trots det kan man under en begränsad tid köra den optiska motorn mer eller mindre som vanligt.

Det finns många olika tekniska lösningar på hur man kan skapa tittgluggar i motorerna, men en relativt vanlig design är den som visas på bilderna. Här har kolven förlängts genom att man fäst en ihållig sektion ovanpå den vanliga kolven. På toppen av detta "rör" monteras den nya optiska kolven, som alltså består helt av glas. Via en 45-graders spegel kan man sedan titta genom kolvförlängningen/glaskolven, in i förbränningsrummet, när motorn går. På liknande sätt kan delar av cylindern fräsas bort och ersättas med glas för att på så vis skapa fler gluggar att titta eller skicka laserljus igenom.

Processen att ta in ny luft, injicera bränsle, antända, elda och skicka ut avgaserna sker flera tusen gånger i minuten. Varje förbränning tar således bara några millisekunder. Möjligheten att kunna se några intressanta detaljer med blotta ögat är med andra ord starkt begränsade.



En optisk motor. Kolven förlängs genom att man fäster en ihållig sektion på den vanliga kolven. Via en spegel kan man sedan titta in i förbränningsrummet när motorn går.



Men med moderna optiska mätmetoder har man fantastiska möjligheter att studera vad som sker under dessa snabba förlopp. Sättet på vilket bränslet sprutas in och blandas är till exempel av avgörande betydelse för både verkningsgrad och emissionsbildning. Med hjälp av höghastighetsavbildning kan bränslets fördelning, både i vätske- och i gasfas, studeras tidsupplöst. Man kan alltså följa hur bränslet förgasas och utbreder sig under en enda cykel. Viktiga frågor som: "träffar några bränsledroppar cylinderväggen?" eller "har vi lagom mycket bränsleånga runt tändstiftet?" kan direkt få sina svar.

BLAND DE VIKTIGA PROCESSER som typiskt studeras i optiska motorer finner vi emissionsbildning. Olika laserbaserade mätmetoder kan användas för att se när under förloppet som de specifika ämnena bildas. Man kan även få information om var i förbränningsrummet de skadliga ämnena bildas, samt hur kemin och miljön ser ut just precis då i detta område. Sådana studier adderar till den existerande kunskapsbanken, och resultaten används i kombination med datorsimuleringarna för att via ökad förståelse ytterligare flytta fram gränserna.

När man ändrar material i komponenter ändras deras egenskaper, både i termisk

konduktivitet men också med avseende på vikt och form. Naturligtvis påverkar detta förutsättningarna mellan en normal förbränningsmotor och en optisk motor. Detta gör att den optiska motorn belastas av en rad kompromisser, jämfört den faktiska motor som används i slutändan. Dessa kompromisser är dock kända för de forskare som utför experimentet. Därmed kan dessa ofta kompenseras för, eller användas vid verifiering av till exempel simuleringsmodeller. Trots kompromisser är värdet av dessa mätningar stort.

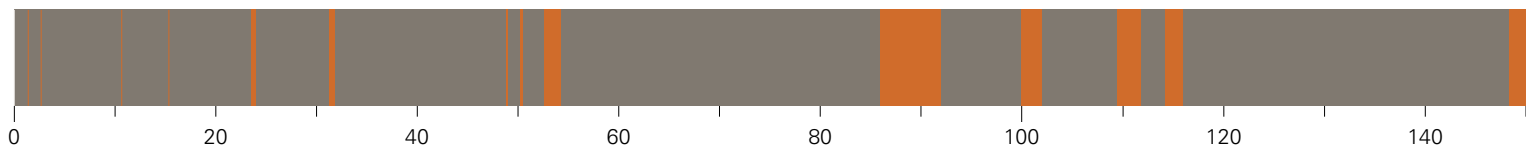
OPTISKA MOTORER ÄR IDAG ett etablerat verktyg för motorstudier, inte bara bland universitet och forskningsinstitut, utan också hos de större motortillverkarna. Vissa av pionjärerna inom området hittar vi faktiskt inom industrin. General Motors kartlade till exempel processerna bakom "knack/spikningar" med hjälp av optiska motorer redan på 1930-talet. Devisen "en bild säger mer än tusen ord" lever vidare ...

MATTIAS RICHTER

Professor i Förbränningsfysik,
Lunds universitet

MARCUS LUNDGREN

Universitetslektor, Förbränningsmotorer,
Lunds universitet



Passivt skydd på agendan 2027

Agenda punkt 1.16 blir en av höjdpunkterna för radioastronomerna på den kommande världsradiokommunikationskonferensen 2027. Fler än 4 000 personer från i princip alla världens länder ska träffas för att uppdatera radioreglementet. Men vad är detta och vad har det med **radioastronomi** att göra?

Radiosignalerna som astronomerna mäter är extremt svaga. Liknelser som, "det skulle ta 10^{12} år (mot-svarande 100 gånger universums ålder) att samla in energin från en normalstark radiokälla för att driva en 60 W glödlampa i en sekund", eller "om du placerar en mobiltelefon på månen skulle det vara en av de starkaste radiokällorna på himlen", brukar användas.

Radioastronomins startpunkt kan dateras till 1932. Telekom-munikations-

ingenjören Karl G Jansky upptäckte då ett radiobrus med okänd källa när han undersökte höga brusnivåer i kommunikationslänkar vid 10 meters våglängd. Efter att ha studerat signalen insåg han att detta så kallade "bakgrundsbrus" var starkast i riktning mot Vintergatans centrum.

Sedan dess har radioastronomi som vetenskap expanderat enormt mycket. Medan radiovågorna från rymden enligt Jansky bara var en form av störning för kommunikationssystemen är det tvärtom idag. Kommunikationssystemen har vuxit till att bli källor till störningar som sätter allvarliga begränsningar för radioastronomi.

För att motverka störningarna måste mottagarna i radioteleskopet skyddas på olika sätt, till exempelvis hårdvarumässigt

eller med hjälp av mjukvara. Det är dock i princip omöjligt att ta bort all störning. Men man kan försöka lösa problemen innan de uppträder.

En ändlig naturresurs

Radiospektrumet är dels en ändlig naturresurs, dels något som är lika tillgängligt överallt på jorden. En effektiv användning av radiospektrumet kan därför endast uppnås genom regler som överenskommit på en global nivå.

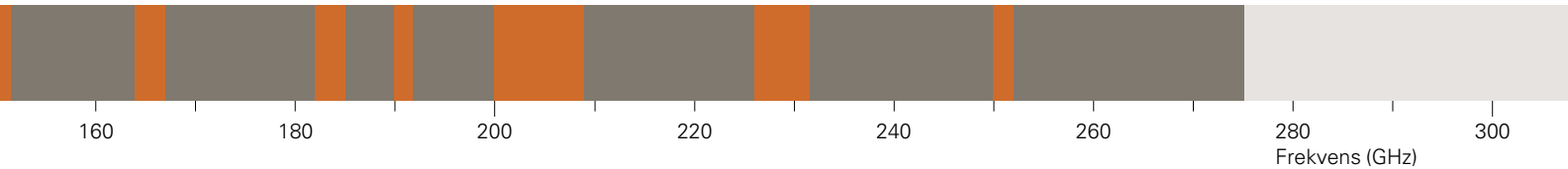
Att se till att reglerna fungerar och skapa nya regler kallas "spektrum management". Dessa fastställs av internationella organ som har till uppgift att främja harmoniseringen av radiospektrumet över hela världen enligt en top-down-approach. Det viktigaste organet är Internationella teleunionens

radiokommunikationssektor (ITU-R) som ansvarar för radiokommunikation inom ITU, ett specialorgan inom

En av de mest betydande vetenskapliga radioastronomiska anläggningarna – ALMA i Chile.



GRAFIK: C. KJELLSTRAND KÄLLA: POST- OCH TELESTYRELSENS ALLMÄNNA RÅD (PTSFS 2019:1) OM DEN SVENSKA FREKVENSPLANEN



FREKVENSTILLDELNING Alla frekvenser mellan 8,3 kHz och 275 GHz är reglerade (markerat med mörkgrått). De orange linjerna markerar de "passiva" frekvensbanden – det vill säga frekvenser där sändningar

är förbjudna enligt RR fotnot 5.340. Även i dessa band förekommer dock en del undantag från sändningsförbudet. (Tjockleken på de tunnaste linjerna har överdrivits för att de ska synas.)

Förenta nationerna. I Europa koordineras dessa frågor av European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT) som samlar alla nationella myndigheter i Europa, inklusive den svenska myndighet som hanterar frågor kring elektronisk kommunikation, Post- och telestyrelsen (PTS).

Radioastronomins röst

Och var kommer radioastronomi in i detta? The Committee on Radio Astronomy Frequencies (CRAF) är en expertkommitté inom European Science Foundation (ESF). Dess syfte är att tillhandahålla en kostnadseffektiv enad röst i frågor om frekvensskydd för europeiska radioastronomiobservatorier, däribland Onsala rymdobservatorium.

Tanken är att man kan påverka betydligt mer tillsammans än som ett enskilt observatorium. Genom att arbeta tillsammans kan europeiska observatorier och institut dra nytta av synergieffekter, täcka många fler ämnen och lära av varandra.

CRAF grundades 1988 och har sedan dess varit mycket engagerad inom ITU-R och CEPT. CRAF har medlemmar i 20 länder. Som representant för CRAF arbetar man alltså både nationellt (till exempel via PTS) och internationellt (via till exempel CEPT och ITU-R).

Det är mycket viktigt att förstå att det är myndigheterna, som till exempel PTS, som bestämmer i slutändan men intresseorganisationer, industrin etcetera har möjlighet att delta i processen och lämna synpunkter. Det är alltså synnerligen viktigt att delta i detta arbete för göra sin röst hörd för "om du inte sitter med vid bordet finns du inte".

En stor del av arbetet inom spektrum management är organiserat kring

den 3–4-åriga cykel av världsradio-kommunikationskonferenser (WRC) som anordnas av ITU. För att ta hänsyn till teknikutvecklingen revideras radio-reglementet (RR) vid WRC, vilket vanligtvis resulterar i en mängd olika aktiviteter på internationell, regional och nationell nivå. Den fyra veckor långa WRC är kulmen på hundratals möten jorden runt och på tusentals förberedande dokument.

ITU-R:s radioreglemente innehåller regler för spektrumanvändning och den viktiga frekvenstilldelningstabellen, som definierar de radiotjänster, både aktiva och passiva, som får verka i ett givet frekvensband.

Passiva band

Radioastronomi erkändes som tjänst i RR 1959, radioastronomitjänsten (Radio Astronomy Service (RAS)), och har idag ett antal frekvensband vilka är berättigade till skydd via de nationella myndigheterna, i Sverige PTS.

Tilldelning av radiotjänst i ett visst frekvensintervall kan vara antingen primära eller sekundära, där den sekundära tjänsten i ett band endast har begränsade rättigheter. Alla RAS-observationer är passiva, det vill säga att de endast gäller mottagning. De så kallade "passiva banden", där alla aktiva utsändningar är förbjudna (RR fotnot nr 5.340), är de mest skyddade. Ett exempel är frekvensbandet 1400–1427 MHz, det vill säga vätelinjen.

Det finns också band som bara har en fotnot i RR, som uppmanar myndigheterna att skydda bandet. Detta är den svagaste formen av skydd, och de nationella myndigheterna bestämmer om denna fotnot ska beaktas för skydda radioastronomi inom landet. Här är det väldigt viktigt att ha en dialog med myndigheterna.

ITU-R och CEPT är dokumentdrivna. Detta innebär att alla aktiviteter, diskussioner och resultat enbart baseras på text som skickats in innan ett möte. För att arbetet ska ske så effektivt som möjligt måste dokumenten från andra grupper (myndigheter, industrin, och så vidare) analyseras i förväg för att kunna ge återkoppling på mötet. Detta kan ske genom beräkningar av de villkor som krävs för att två radiotjänster ska kunna samexistera (aktiva-aktiva, aktiva-passiva tjänster). Radioastronomi, som en passiv tjänst, är vanligtvis den tjänst som drabbas i sådana beräkningar.

Det räcker dock inte att bara presentera dokumentet på mötet. Det krävs omfattande lobbyverksamhet för de ståndpunkter som RAS har för att maximera stödet från de nationella myndigheterna som är de som fattar besluten. Förberedelse, presentation och lobbying är därför en primär roll för CRAF, både på nationell och internationell nivå.

Skyddet av radioastronomi från antropogena sändningar (till exempel radio, TV och mobilnät) är i princip redan välorganiserat. Den snabba utvecklingen av satellitsektorn har dock överträffat ITU-R-regleringarna, som inte förutsåg en sådan tillväxt. Under de senaste åren har antalet satelliter runt jorden ökat nästan exponentiellt. Även om de många nya tillämpningarna och tjänsterna utan tvekan är nyttiga, utgör det stora antalet satelliter ett betydande hot mot astronomin.

Satelliter på kommande agenda

Den senaste WRC ägde rum i Dubai i slutet av 2023. I en mycket konstruktiv process kom myndigheterna då överens om att skapa en ny agendapunkt, 1.16, till kommande WRC som ska hållas 2027. ►

RADIOASTRONOMI



En av antennerna
i SKAO i Sydafrika.

FOTO: SKOMAX/ALEXANDER

länder, med löften om betydande förbättringar inom bland annat utbildning, infrastruktur och internationellt samarbete. Sverige har, genom Onsala rymdobservatorium, sedan länge haft ett betydande engagemang i både ALMA och SKAO.

En egen agendapunkt

Det här är första gången på mer än 10 år som radioastronomi har en specifik agendapunkt. Agendapunkten är långt ifrån enkel, CRAF är hur som helst definitivt redo och vi har redan utvecklat lämplig programvara för att genomföra kompatibilitetsberäkningar, studerat de befintliga reglerna ingående och inlett samarbete med satellitoperatörer. Att få till stånd agendapunkten var bara en kort del av ett maratonlopp; mållinjen är satt till nästa WRC år 2027, med förhoppningen att det kommer att ge bättre skydd för radioastronomi.

MICHAEL LINDQVIST
Onsala rymdobservatorium

► Här ska man behandla frågor relaterade till hur radioastronomi kan skyddas från störningar från satelliter i icke-geostationära banor. CRAF och andra radioastronomiorganisationer deltog mycket aktivt, både på plats i Dubai och i det förberedande arbetet, för att få in denna punkt. Specifikt innebär det bland annat att vi nu inför mötet 2027 studerar hur två av de mest betydande vetenskapliga radioastronomianläggningarna – SKAO

i Sydafrika och ALMA i Chile – påverkas av så kallade megakonstellationer av satelliter¹. Båda teleskopen har mycket stor betydelse för utvecklingen i sina respektive

¹ En *konstellation av satelliter* är en större grupp satelliter som fungerar tillsammans som ett enhetligt system. En *megakonstellation* kan innehålla hundratals eller till och med tusentals satelliter. Den kanske mest kända megakonstellationen är Elon Musks Starlink-nätverk.

Vill du också veta mer om rymden?

Prenumerera för det senaste inom astronomi och rymdforskning i brevlådan 4 gånger/år!

Skanna QR-koden för att prenumerera!



5 nummer
för 350 kr
introduktions-
erbjudande!

I Populär Astronomi hittar du reportage, personporträtt och nyheter om rymden och astronomi – alltid med fokus på svensk forskning och alltid skrivet av kunniga vetenskapsjournalister och forskare. Vi har bevakat astronomi och rymdforskning i över hundra år och vi har alltid koll på det senaste!

Astronomi

POPULÄR



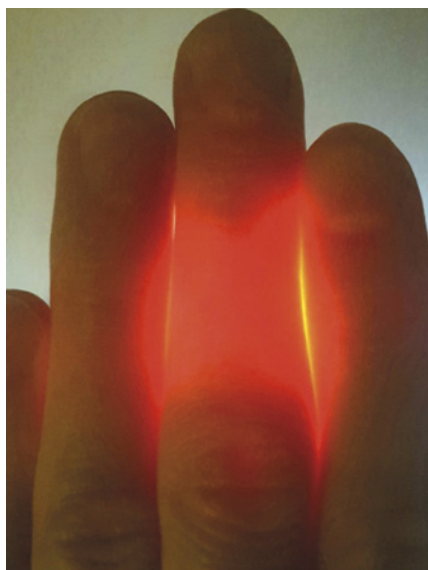
Att se inuti kroppen med ljus och ultraljud

I Lund håller forskare på att utveckla ett supersmalt filter som **saktar ner ljus**, och som kan bli en viktig pusselbit i en ny metod för att se in i kroppen.

Att kunna undersöka insidan av kroppen har länge varit avgörande för medicinska framsteg. Till exempel har röntgenstrålning gett oss möjlighet att skapa detaljerade bilder av ben och inre strukturer, medan MR (magnetresonanstomografi) kan används för att skapa bilder av mjuka vävnader. Ultraljud är en annan teknik som många känner till framför allt från dess användning för att avbilda foster under graviditeten. Ultraljud fungerar genom att man använder skillnader i akustisk impedans – alltså hur kroppen reagerar på ljud – för att skapa bilder.

Alla dessa metoder har såklart sina nackdelar: röntgen använder joniserande strålning som kan medföra risker vid upprepad användning, MR kräver ofta kontrastvätska för att förbättra bildkvaliteten och själva undersökningen kan ta lång tid, och för ett ultraljud som endast påverkas av de akustiska egenskaperna kan många olika vävnader se identiska ut. Det är därför intressant att söka efter nya, kompletterande metoder för att undersöka kroppen.

När vi ska bedöma om något ser normalt eller avvikande ut förlitar vi oss ofta på synen, men det är svårt titta inuti kroppen med hjälp av ljus. Även om vi oftast bara ser hudens yta, kan ljus faktiskt tränga igenom kroppen till viss del. Ett enkelt experiment som visar detta ser du i figur 1, där en ficklampa hålls mot ett finger och man ser ett rött sken – ljuset går igenom fingret! Infrarött ljus har ännu bättre förmåga att tränga genom vävnader än synligt ljus. Men problemet är att ljuset sprids när det passerar genom kroppens vävnader, vilket gör det svårt att veta var ljuset har varit eller vad det har passerat



FIGUR 1 Ljuset från en ficklampa kan gå genom vävnaden, dock sprids ljuset i processen så man ser inte skelettet.

genom. Det är därför du inte ser något skelett i figur 1.

För att lösa problemet med spridningen håller forskare på att utveckla en medicinsk metod som kallas Ultrasound Optical Tomography (UOT). Kortfattat går den ut på att man kringgår spridningen av ljuset genom att endast detektera ljus som har varit på samma plats som en ultraljudspuls – som kan vara vällokaliserad inuti kroppen.

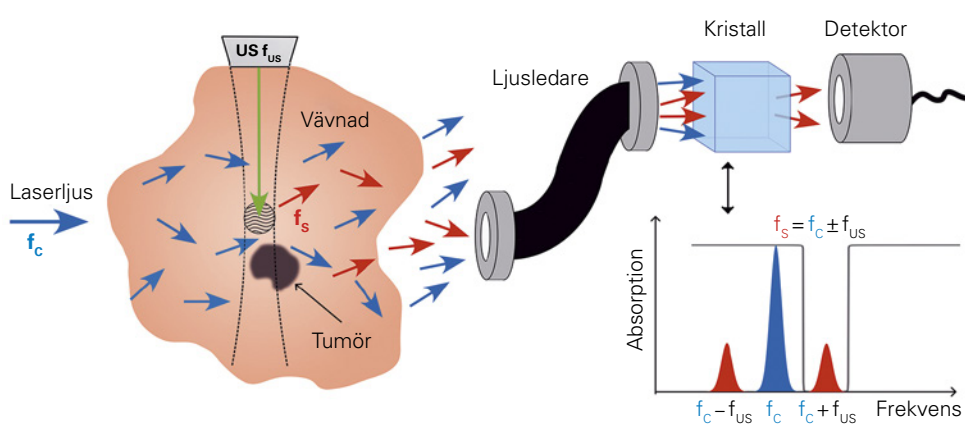
Den här metoden kräver ett väldigt skarpt filter som kan filtrera bort allt ljus som *inte* har interagerat med ultraljudet. Vid Lunds universitet pågår forskning där man utvecklar sådana filter, som bland annat saktar ner ljusets hastighet från 300 000 000 m/s (som i vakuum) till 10 000 m/s.

I framtiden kan UOT potentiellt användas för att mäta syresättningen i vävnader djupt inne i kroppen på ett icke-invasivt sätt. Det innebär att tekniken skulle kunna användas för att upptäcka och övervaka hjärtattacker, stroke eller cancer, vilket gör den till ett lovande verktyg inom medicinsk diagnostik. Eftersom metoden är helt icke-invasiv och varken kräver joniserande strålning eller kontrastvätskor kan den också användas oftare än andra metoder, vilket möjliggör snabbare och bättre medicinska beslut.

Hur fungerar Ultrasound Optical Tomography (UOT)?

I figur 2 (på nästa uppslag) visas en principskiss över hur UOT fungerar. En ultraljudspuls (US, grön pil) propagerar genom vävnaden samtidigt som den belyses med laserljus (blå pilar). Det ljus som når ultraljudet kan interagera med ljudvågen, vilket ger en liten ändring i ljusets frekvens (röda pilar). Med hjälp av en ljusledare kan man samla in det ljus som sprids efter att det lämnat kroppen och leda det till en kristall dopad med sällsynta jordartsmetaller. Kristallen har förberetts så att det ursprungliga laserljuset (blått) absorberas, medan det frekvensskiftade ljuset (rött) transmittas till en detektor. Genom att undersöka hur mycket frekvensskiftat ljus som detekteras när ultraljudet är på olika ställen i kroppen, kan man kartlägga strukturer genom deras optiska kontrast.

Det är denna process som gör det möjligt att skapa en bild av kroppens inre. Om ultraljudspulsen till exempel överlappar med en tumör med högre absorption ►



FIGUR 2 Principskiss över hur Ultrasound Optical Tomography (UOT) fungerar.

► än den omgivande vävnaden, kommer mindre frekvensskiftat ljus detekteras. Ljuset måste ju ha befunnit sig vid ultraljudspulsen för att bli frekvensskiftat, och där är absorptionen hög.

Sällsynta jordartsatomer och smala frekvensfilter

Att detektera ljus som har frekvensskiftats när det passerar genom en ultraljudspuls allteftersom ultraljudspulsen propagerar genom vävnaden är ett elegant sätt att få en bild av hur absorption och spridning varierar i vävnaden. Svårigheten är att bara ca 0,1–1 % av det ljus som kommer ut ur vävnaden har frekvensskiftats. För att inte signalen från det skiftade ljuset skall dränkas i bakgrundsbruset från det flera storleksordningar starkare oskiftade ljuset måste det oskiftade ljuset elimineras eller dämpas kraftigt. Detta försvåras av att frekvensskiftet är mycket litet.

För att få en känsla för hur litet frekvensskiftet är, är det kanske lättast att titta på våglängden på ljuset. Ultraljudspulsen har en frekvens som är ungefär 8 storleksordningar lägre än ljusets. Det inkommande ljuset har en våglängd på runt 800 nm, och det frekvensskiftade ljuset har alltså en våglängd på 799,99999 nm. Om vi föreställer oss att ljusets våglängd är lika lång som Sverige (1 600 km) hade detta motsvarat att upptäcka en skillnad på 2 cm! Det finns interferensfilter som kan separera två frekvenser som ligger runt 100 GHz från varandra, men för den här metoden

behövs filter som är åtminstone 5 storleksordningar smalare.

För att bygga tillräckligt smala filter tar vi hjälp av kristaller dopade med sällsynta jordarter. Till exempel användes en litiumniobatkristall dopad med Tm för

UOT-bilden i figur 4 (Tm kan användas till filter vid 800 nm och 700 nm).

För de flesta atomer är det de yttre elektronerna som har synliga energiovergångar. I fasta material blir de synliga övergångarna då kraftigt breddade och kortlivade, eftersom att de yttre elektronerna hela tiden känner av och växelverkar med de yttre elektronerna i bredvidliggande atomer. Sällsynta jordartsatomer skiljer sig från de flesta andra genom att de har djupt liggande elektronskal som bara är delvis fyllda. Elektroner i dessa skal är skyddade från omgivningen av de yttre elektronerna som effektivt sett bildar en Faradays bur, vilken skärmar av de elektriska fluktuationerna från de ständigt vibrerande omgivande atomerna. Optiska övergångar mellan olika tillstånd i det ofyllda skalet kan därför vara ostörda och ha väldigt väl bestämda övergångsfrekvenser även i fasta material, och de

Optisk pumpning

Figur 3 a), visar en principskiss för absorption som funktion av frekvens hos en kristall dopad med sällsynta jordartsatomer. I en slumpmässigt dopad kristall har de individuella jordartsatomerna lite olika omgivning, vilket gör att deras övergångsfrekvenser blir lite olika. Frekvensen f_0 är den frekvens där flest jordartsatomer har sin övergång och absorption.

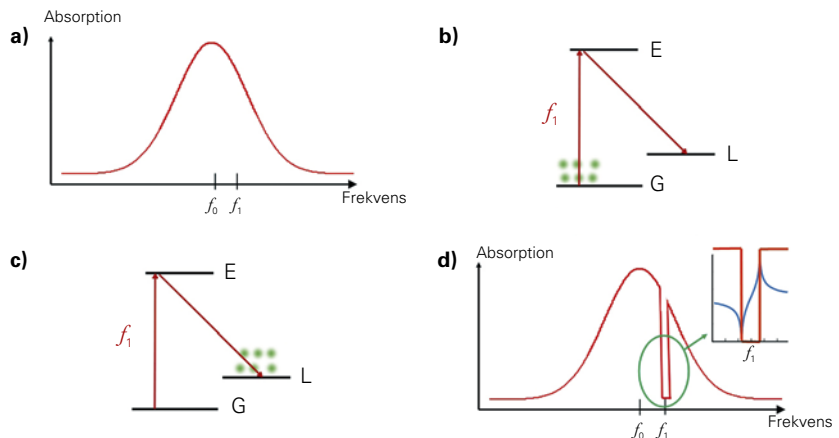
Antag att vi vill göra ett filter som släpper igenom frekvensen f_1 . b) visar energinivåerna för de atomer som absorberar ljus vid frekvens f_1 . Vi ser ett grundtillstånd, G där det ligger ett stort antal atomer, ett optiskt exciterat tillstånd, E, och ett lågt liggande långlivat tillstånd, L.

Nu belyser vi kristallen med ljus på

frekvensen f_1 . Detta ljus exciterar atomerna i G till tillståndet E och de kan sedan falla tillbaka till antingen tillstånd G eller L. Fallar de tillbaka till G så kommer de exciteras igen och återigen falla tillbaka ner till ett av tillstånden.

Slutligen kommer alla atomer samlats i tillstånd L (se c)). Då kommer absorptionsprofilen nära frekvensen f_1 se ut som i d). Vi ser att det inte längre finns någon absorption på frekvensen f_1 . Det betyder att kristallen nu är transparent på frekvensen f_1 men den absorberar fortfarande på frekvenser som är nära f_1 .

Detta sätt att utnyttja ljus för att flytta atomer från ett tillstånd till ett annat kallas optisk pumpning.



FIGUR 3 Principskiss för absorption som funktion av frekvens.

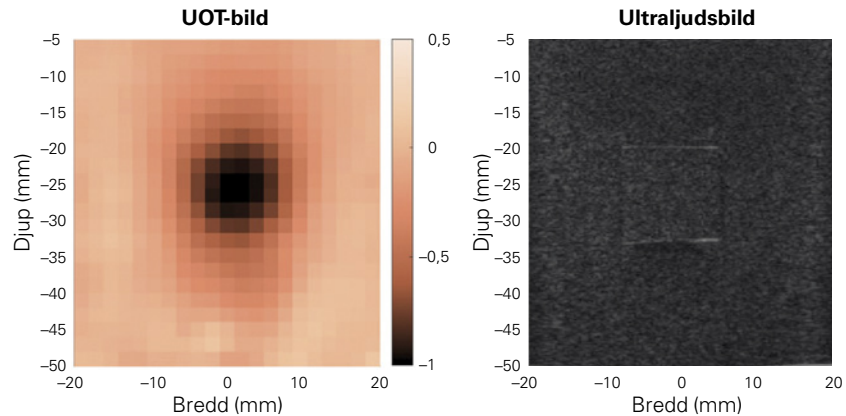
exciterade elektrontillstånden kan vara mycket långlivade.

Vid låga temperaturer, några få Kelvin, kan sällsynta jordartsatomer dessutom ha lågt liggande tillstånd där de kan stanna i dagar innan de byter tillstånd. Med dessa material kan vi skapa filter som bara släpper igenom ljus i ett extremt smalt frekvensintervall genom att använda så kallad *optisk pumpning* (figur 3).

Långsamt ljus

Efter att ha preparerat kristallen med optisk pumpning väljer vi nu frekvensen i vår UOT-mätning så att den skiftade frekvensen ligger precis på den transparenta frekvensen f_1 medan det oskiftade ljuset, som ligger på en annan frekvens, absorberas. Det finns många sällsynta jordartsatomer i kristallen som kan absorbera, så absorptionen kan vara mycket kraftig, men det kan ändå hända att inte riktigt allt ljus på den ursprungliga frekvensen absorberas. Då erbjuder jordartsatomerna ytterligare en intressant möjlighet. De kan nämligen sakta ner det frekvensskiftade ljuset i kristallen från 300 000 km/sekund till ca 10 km/s! Det gör att det frekvensskiftade ljuset kommer ut ur kristallen senare än det oskiftade ljuset, och genom att vänta med att aktivera vår detektor tills det oskiftade ljuset lämnat kristallen kommer detektorn bara att registrera det skiftade ljuset.

Så varför saktar det frekvensskiftade ljuset in mer än en faktor 10 000? En komplett fysikalisk förklaring kräver en egen artikel (läs mer i *Fysikaktuell* nr 3/2016) men övergripande så är absorption och brytningsindex hos ett material knutna till varandra. Detta beror på att brytningsindex bestäms av i vilken utsträckning elektronerna svänger i takt med det elektro-magnetiska fältet (ljuset), och absorption uppstår när en elektron svänger med så mycket att den byter energitillstånd. Om man ändrar absorption för ett material så ändras därför även brytningsindex, och en ändring i absorption som funktion av frekvens genererar också en ändring av brytningsindex som funktion av frekvens. I övre högra hörnet i figur 3d) visar den blå kurvan hur brytningsindex varierar i



FIGUR 4 Vänstra bilden visar en UOT-bild av en vävnadsfantom svarande mot bröstvävnad med en centralt liggande cancertumör. Högra bilden visar en ultraljudsbild av samma område.

transmissionsfönstret kring frekvensen f_1 . Utbredningshastigheten av en ljuspuls i materialet bestäms i sin tur av hur snabbt brytningsindex ändrar sig som funktion av frekvens. Ju kraftigare brytningsindex ökar med frekvensen desto långsammare propagerar ljuspulserna och om brytningsindex minskar med frekvensen så ökar ljuspulsens hastighet. Det går att manipulera absorptionen i ett material så att ljuspulser saktas ner till hastigheter som bara är några meter per sekund, och det går också att få vissa ljuspulser att propagera snabbare än ljushastigheten i vakuum (!). Det finns dock en del begränsningar, till exempel kan information inte skickas snabbare än ljushastigheten i vakuum.

Detektion av brösttumörer

Genom att plocka bort de atomer som absorberar och sakta ner den frekvensskiftade ljuspulsen kan vi få ner bakgrundsbruset tillräckligt för att se intensitetsändringar i det frekvensskiftade ljuset för olika positioner av ultraljudspulsen. Hur kan då våra bilder se ut? För att testa de har vi tillverkat "vävnadsfantomer" med optiska egenskaper som svarar mot bröstvävnad. I centrum av fantomen har vi placerat en kub som är ca $12 \times 12 \times 12$ mm, med optiska egenskaper som svarar mot en brösttumör. De optiska egenskaperna för såväl frisk bröstvävnad som tumörer varierar kraftigt. Det kan vara stora skillnader mellan olika personer och mellan olika tumörer men de valda värdena utgör, som vi bedömer

det, ett rimligt genomsnitt. I figur 4 ser vi två tvådimensionella bilder. Den högra är tagen med ultraljud. Ultraljud detekterar huvudsakligen mekaniska och elastiska skillnader i vävnader, och i vårt fall är dessa samma hos de båda delarna av fantomen. Därför detekterar ultraljudet inga skillnader mellan "frisk vävnad" och "tumörvävnad". De ljusa, vågräta strecken i bilden kommer från luftbubblor, som sitter i gränsen mellan "tumörvävnaden" och den "friska" vävnaden. I övrigt ser "tumör" och "frisk vävnad" likadana ut. UOT signalen (vänstra bilden) visar dock en tydlig skillnad mellan "frisk vävnad" och "tumör". Bilderna illustrerar tydligt att UOT har möjlighet att detektera vävnadsskillnader som ultraljud (eller röntgen) inte kan avslöja.

Resultaten ovan är intressanta men det återstår naturligtvis mycket arbete för att kunna bedöma hur användbar tekniken kan vara. Många frågor är obesvarade. Hur bra rumsupplösning kan vi få? Hur snabbt kommer vi kunna registrera en bild? Hur ser bilderna ut i riktig vävnad och hur djupt ner i vävnaden kommer vi kunna nå? Experter på ultraljudsteknik, optik, ljus-materia växelverkan/kvantteknologi och medicin hjälps alla åt för att utveckla tekniken, som förhoppningsvis kan komma till nytta för människor framöver.

STEFAN KRÖLL

Professor i atomfysik, Lunds universitet

ADAM KINOS

Biträdande universitetslektor
i atomfysik, Lunds universitet

Smarta klockor för träning och hälsa

En smartklocka är utrustad med flera vitala sensorer, både för hälsa och fysisk aktivitet. Några av de mest använda registrerar **din position, hur du rör dig, puls och syremättnad**. Men hur fungerar de egentligen?

Ju förr desto bättre är inte alltid sant när det gäller klockor. Tidiga armbandsur var mekaniska och drevs av en fjäder som drogs upp. Takten hölls av en så kallad oro, ett litet kugghjul som rör sig fram och tillbaka. Det hade en frekvens på några hertz. År 1952 kom den första batteridrivna klockan med stegmotor och 1962 presenterades stämgaaffeln som takthållare. Det ökade frekvensen till flera 100 Hz. Ännu högre frekvens kom 1969 med en kvartskristall i en oscilatorkrets. Då behövdes en kompromiss mellan motorns behov av 1 Hz och kvartskristallens frekvens. Elektroniken räknar binärt och med hänsyn till kristallens dimensioner valdes en frekvenshalvering på 15 gånger, ty $2^{15} = 32\,768$. Den kom att bli världsstandard.

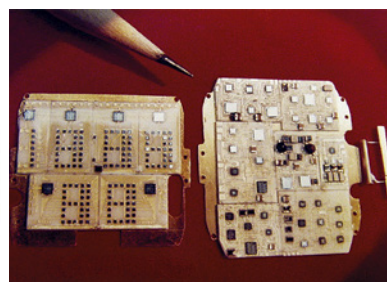
Tyst och stilla

Den första digitala klockan utan rörliga delar, "Pulsar", kom 1969 (figur 1). Den tillverkades av Hamilton Watch Company i USA. Snabbt kom även japanska företag som Seiko med digitala klockor.

Den första Pulsarklockan hade en tidsmodul med displaykretsar och ett 4,5 V uppladdningsbart NiCd-batteri. Tiden levererades av en kvartskristall som vibrerade med 32 768 Hz och tiden avvek inte mer än tre sekunder i månaden, vilket gjorde den till det då mest exakta armbandsuret i världen. De röda siffrorna i LED-displayen skapades med en lysdiod av AlGaAs.

När sedan stoppursfunktion infördes samtidigt som klockorna var vatten- och stöttåliga med låg vikt, blev "sport-

FOTO: DENNIS L. KLEIN



FIGUR 1 Till vänster och i mitten en Pulsar från 1970. Till höger en Garmin sportklocka.

klockan" en favorit för fysiskt aktiva. I takt med ökad miniaturisering har allt fler funktioner adderats som accelerometer, gyroskop, pulsmätare, termometer, kompass och GPS.

Rörelsesensorer

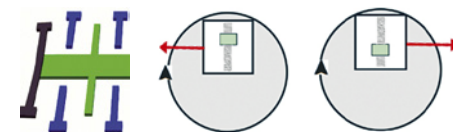
Rörelsesensorer finns i de flesta smarta klockor och bygger på relativ rörelse i tre dimensioner. En så kallad accelerometer mäter linjär acceleration. Den kan bestå av en kapacitiv sensor, i vilken två mikrostrukturer rör sig i förhållande till varandra vid acceleration (figur 2). Då ändras kapacitansen, vilket kan mätas. I piezoelektriska sensorer känner kristaller när de utsätts för en kraft (= acceleration). Det ger en elektrisk signal som visar hur stor kraften är. Piezosensorer väger lite, har hög frekvens, är små, robusta och har hög känslighet, men ger svaga signaler och är därmed känsliga för störningar.

För att mäta vridning eller rotation utnyttjas corioliseffekten. En vibrerande struktur (figur 2) påverkas av en kraft vinkelrätt mot sin rörelse när den roterar. Den uppmätta förskjutningen kan användas för att bestämma vinkelhastighet och riktningssändring. En sådan anordning

kallas gyroskop. Jämfört med mekaniska gyroskop stabiliserar den dock inte rörelsen.

Hjälp från ovan

Navigering via satellit ger klockans plats och spårar dess rörelse över tid med en noggrannhet på några meter. De vanligaste är de tre militära, GPS från USA, GLONASS från Ryssland, Beidou från Kina samt den civila Galileo från EU. De två första introducerades på 1990-talet, Beidou-3 runt 2020 och Galileo 2015. De har cirka 20 satelliter vardera



FIGUR 2 Till vänster rör sig den gröna delen relativt den fasta blå och kapacitansen ändras. I mitten visas att när man vrider på klockan (=grå skivan) kommer den gröna, fjäderupphängda, rörliga massan på efterkälken när den rör ut från centrum och en tröghetskraft uppstår åt vänster, visat av röda pilen. Till höger bli det omvänt när den rörliga massan rör sig in mot centrum. Skeendet liknar vindarna runt låg- och högtryck.

på ungefär 22 000 km höjd och sänder på runt 1 GHz. Med minst tre satelliter synliga över horisonten kan positionen beräknas. GPS är vanligast, men för hög precision och god täckning kan man välja att kombinera med de andra, vilket dock drar mer batteri.

Magnetometer

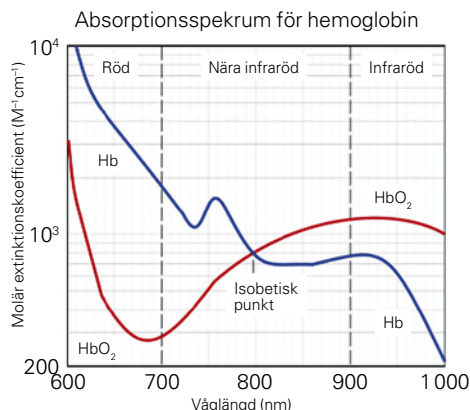
Med en kompass/magnetometer indikerar klockan norr. Vissa klockor utnyttjar Hall-effekten, där en strömförande ledare i magnetfältet ger en spänning på ledaren vinkelrätt mot strömmen och magnetfältet. Andra utnyttjar magnetoresistivt permalloy som ändrar resistansen när det känner av ett magnetfält.

Pulsoximetri kom på 1970-talet

Blodets syremättnadsnivå är en viktig hälsoparameter. Den kan mätas med en pulsoximeter, vanligt förekommande på sjukhus och vårdinrättningar, inte minst under covid-19. Denna placeras på ett finger, en örsnibb eller liknande, där vävnaden är så tunn att en viss mängd ljus kan passera igenom och detekteras på andra sidan (se figur 3). Ljuset som absorberas av icke-pulserande vävnader är konstant, medan pulserande blod ger en icke-konstant absorption. Dioderna blinkar med 30 Hz för att förbättra precisionen. Absorptionen av 660 nm (rött) och 940 nm (IR) är tillräckligt olika för de två våglängderna för att få en bra känslighet (figur 3). Absorptionsförhållandet för de två ljusvåglängderna ger blodets syremättnadsnivå i procent. Denna kallas SpO_2 (saturation peripheral oxygen) och ska ligga på minst 95 %. Dessutom erhålls pulsfrekvensen.

Puls

En handled är för tjock för ljusgenomsläpp, och därför måste en smartklocka förlita sig på en reflektionsmetod. Under en smartklocka finns lysdioder och fotodioder (figur 3). Vanligtvis används rött (660 nm) och grönt (540 nm) ljus. Grönt, men inte rött, absorberas i de syrerika blodkärlen, och ur skillnaden kan syremättnadsnivån beräknas. Fotodioderna mäter också förändringen av det gröna ljuset som ett mått på pulsen. Hudfärg och



FIGUR 3 Överst till vänster pulsoximeter för finger. Överst till höger absorptionen av syresatt och syrefattigt blod. Underst pulsklocka med pulsoximeter-värde.

tatueringar kan dock påverka hur grönt ljus passerar.

Tidigare använde man ett pulsband på bröstet. När ett hjärta slår flödar Na- och K-joner fram och tillbaka över cellmembranen, vilket genererar potentialskillnader på cirka 100 mV. Dessa sprids till huden och är där 1–2 mV. De kan registreras av två elektroder i pulsbandet. Denna metod ger bättre precision än mätning på handleden, men kräver ett pulsband.

Temperatur

Smartklockor har vanligtvis två temperatursensorer – en på baksidan nära huden och en strax under displayen. Hudsensorn används för att mäta mängden värme

som försvinner från en kropp efter ansträngning eller träning. Detta hjälper till att övervaka aktiviteterna som höjer kroppstemperaturen. En sensor för omgivningstemperatur används för att mäta temperaturen i miljön. De har en NTC-resistor som ofta kallas termistor. NTC = Negative Temperature Coefficient, det vill säga en komponent som ändrar (minskar) sin resistans i takt med ändrad (ökad) temperatur.

■ Nästa artikel handlar om vilka mätdata dessa sensorer förmår att leverera.

MAX KESSELBERG
Stockholms universitet



Från detalj till helhet

Gy25

I **Nk! Naturkunskap** har vi fångat naturvetenskapens alla delar, från de små detaljerna till de stora sammanhangen. Elevnära texter kompletteras med pedagogiska illustrationer som gör naturvetenskapen engagerande och lättare att förstå. Läromedlet ger all den kunskap som behövs för att förstå sambanden mellan natur, individ och samhälle.



Kostnadsfri
elevwebb med
laborationer och
fältstudier!

nok.se/naturkunskap