

Kvantdatorer · På väg mot Jupiter · Symmetribrott

Fysikaktuellt

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDET

NR 1 • FEB 2024



Slumpvandring i en gräddbakelse



Svenska Fysikersamfundet

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

Ordförande: Jonathan Weidow,
jonathan.weidow@chalmers.se

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

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

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

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,
Johan Mauritsson, Anne-Sofie Mårtensson,
Asta Pellinen Wannberg och Elisabeth Rachlew.

Ansvarig utgivare: Jonathan Weidow.

Kontakta redaktionen via:
fysikaktuell@fysikersamfundet.se

För insänt, ej beställt material ansvaras inte.

Manusstopp och deadline för annonsbokning:
för Fysikaktuellt 2/2024 är 22 mars 2024.

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 2024



OMSLAGSBILDEN: Brownsk rörelse, eller slumpvandring, kan beskriva en mängd fenomen. Till exempel hur lång tid det tar för en foton att vandra genom nyslagen grädde i en italiensk Maritozzi, motsvarigheten till våra semlor. Läs mer på sidan 24. Foto: Johan Mauritsson

Stödjande medlemmar

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

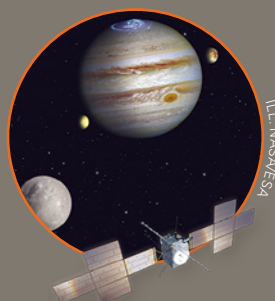
Stödjande institutioner

- Chalmers tekniska högskola
– Institutionen för fysik
- Chalmers tekniska högskola
– Institutionen för rymd och geovetenskap
- Chalmers tekniska högskola
– Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap – MC2
- Göteborgs universitet
– Institutionen för fysik
- Högskolan i Halmstad
– IDE-sektionen
- Institutet för rymdfysik, Kiruna
- Karlstads universitet – Institutionen för ingenjörsvetenskap och fysik
- Kungliga tekniska högskolan
– Institutionen för fysik
- Kungliga tekniska högskolan
– Institutionen för tillämpad fysik
- Linköpings universitet – Institutionen för fysik, kemi och biologi (IFM)
- Linköpings universitet – Institutionen för naturvetenskap och teknik (ITN)
- Linnéuniversitetet – Institutionen för fysik och elektroteknik
- Luleå tekniska universitet
– Institutionen för teknikvetenskap och matematik
- Luleå tekniska universitet – Institutionen för system och rymdteknik
- Lunds universitet
– Fysiska institutionen
- 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**
Tomas Brage
- 4 **AKTUELLT**
- 5 **LISE MEITNER-DAGARNA 2024**
- 8 **AVHANDLINGEN**
Elisabetta Nocerino
undersöker symmetri-
brytande fenomen
- 11 **INTERVJU**
Elisabetta Nocerino
- 12 **WALLENBERGS FYSIKPRIS**
Erik Dahlbergsgymnasiet
i Jönköping vinnare
- 15 **ENORMA PRECISIONS-
MÄTNINGAR**
- 18 **RECENSIONER**
- 21 **BATTERIFORSKNING**
Vetenskap och teknologi
hand i hand
- 24 **GOD FYSIK**
Maritozzi con la panna
- 26 **HUR GÅR DET
MED KVANTDATORN?**
- 29 **JAKTEN PÅ NEUTRINERNA**
- 30 **VARDAGENS FYSIK**
En historia med spets



I april 2023 påbörjade rymdsonden Juice sin resa mot Jupiter. Med sig har den bland annat ett instrument som utvecklats och byggts vid IRF i Kiruna. Läs mer på sidan 6.

Varför tar det sån tid?

Under lång tid har vi oroats över att fysiken på universitet och högskolor bara verkar attrahera och behålla vissa grupper av människor. Vi har vänt och vridit på detta, försökt hitta nya sätt att arbeta på och nya fokus. Men trots detta utgör kvinnor endast en bråkdel av våra studenter i fysik – och vad det gäller etniska och andra minoriteter verkar siffrorna vara lika deprimerande. Så vad är problemet?

Forskning och undersökningar ger oss hjälp – vi vet att unga kvinnor och män, eller flickor och pojkar, är lika intresserade av fysikens metoder. De finner den empiriska metoden med modeller baserade på logiska och matematiska resonemang intressanta i lika hög grad, och de klarar fysikstudierna lika bra. Men det finns skillnader i vilka tillämpningar och vilka exempel man finner intressanta. Detta ger oss hopp – vi kan ändra oss och därmed bredda vår rekrytering, utan att ge upp fysikens metod och ”själ”.

Satsningar på rekrytering är naturligtvis viktiga – vi behöver möta unga människor och diskutera fysik. Men det finns också en fälla där vi riktar in oss på att övertala eleverna om hur roligt, spännande och nyttigt fysik är – men sällan ställer oss frågan om vem som tycker våra exempel, tillämpningar eller beskrivningar är roliga och spännande. Vi frågar oss helt enkelt för sällan varför vissa grupper av elever väljer bort eller lämnar fysiken. Istället för att förbättra hur vi beskriver och gör fysik försöker vi ändra de som väljer bort.

Forskningen är tydlig – vi behöver förändra fysikens kultur! Studenter från minoritetsgrupper beskriver hur de inte känner sig hemma i den värld vi har skapat kring fysiken. Det kan gälla hur den tillämpas, men också vilka exempel som tas upp. Fysiken innehåller många abstrakta resonemang och därför blir metaforer och analogier viktiga. I allt detta blir studenternas erfarenheter, bakgrund och intressen viktiga – är metaforen begriplig och inkluderande? Kan den ens förstås av alla?

Studenter beskriver hur de ibland inte känner att de hör hemma i fysikstudierna och att de drabbas av det som på engelska



FOTO: ELLEN SANDUM

kallas ”impostor syndrome” – att man känner sig som en inkräktare, den enda för vilken fysiken inte är självklar. Vi som lärare blir fascinerade av de elever och studenter som verkar göra fysik utan ansträngning och tenderar att ge dem mer uppmärksamhet och plats. Men varför är fysiken enkel för vissa och besvärligare för andra? Finns det hinder i hur vi beskriver den och vilket ”kapital” olika studenter har med sig? Hur var deras tidigare utbildning? Vad gör deras föräldrar och andra närstående? Är exempel beskrivna på ett sätt som är begripligt för alla, eller förutsätter det erfarenheter av till exempel sport, maskiner eller superhjältar? Förutsätter vi att våra studenter känner till den akademiska kulturen?

Så en början kan vara att vi ifrågasätter vår kultur och hur inkluderande den är. När vi säger att fysiken är kul och drivs av nyfikenhet, så kan vi fråga oss för vem är den rolig och vems nyfikenhet den stillar? Om vi börjar lyssna aktivt på de vi vill rekrytera till och behålla inom fysikutbildningen, så kan vi också påbörja en förändringsresa där vi förbättrar fysikens kultur för alla. Troligtvis skapar vi då också en bättre fysik i framtiden. Vi inkluderar människor med många olika erfarenheter och bakgrunder – det ger bättre resultat!

TOMAS BRAGE

Ordförande för Sektionen för jämställdhet
och lika villkor i fysik

Öppet på KTH

■ Kungliga Tekniska Högskolan anordnar regelbundet öppna föreläsningar som tar upp aktuella ämnen och presenterar forskning i populärvetenskaplig form. Programmet för våren 2024 var fortfarande under arbete när denna tidning gick till tryck, men kommer att dyka upp på www.kth.se/om/mot/evenemang/oppna.

Dessutom kan man se föreläsningarna i efterhand på: www.kth.se/om/mot/evenemang/genomforda-evenemang/arkiv.

Kom ihåg dina medlemsförmåner!

■ Du har väl inte missat att du som medlem i Svenska Fysikersamfundet har 20% rabatt på en prenumeration på *Forskning & Framsteg* (10 nr)? Länken på sidan 2 av den här tidningen har varit inaktuell, men är nu uppdaterad. Du hittar beställningssidan på: order.flowy.se/fof/fof/4140

Poddtipset

Marcus Wandt.



FOTO: ESA/P-SEBIROT

Europeisk rymdpodd

■ I podcasten *ESA Explores* får vi följa med den europeiska rymdstyrelsen bakom kulisserna på europeisk rymdfart. I januari inleddes en serie intervjuer med de nya astronauterna. Först ut var Marcus Wandt, som den 18 januari blev tredje svensk i rymden. Han pratar bland annat om vad träningen till astronaut innebär.

blogs.esa.int/exploration/category/podcasts/



Förslag: öronmärk pengar till STEM-organisationer

■ Regeringen aviserade i höstas att den vill ta fram en STEM-strategi (Science, Technology, Engineering and Mathematics) med syftet att få fler unga att påbörja – och fullfölja – utbildningar inom området. För att få underlag för arbetet har den bitt om ”inspel” från bland annat universitet och högskolor.

Tolv organisationer som arrangerar läger och tävlingar med STEM-koppling för barn och unga har skickat in ett gemensamt förslag. En av undertecknarna är Hans Jakobsson, ordförande i Fysikersamfundets undervisningssektion:

– Vi trycker på att våra aktiviteter fungerar som ett komplement till skolan och ger barn och unga nya utmaningar, förebilder och möjligheter att dela sina intressen med andra. I vårt arbete har vi nära och goda kontakter med universitetsvärlden och i kombination med våra ideella insatser kan arrangemangen nå många till låga kostnader och konkret visa hur

vägen in till naturvetenskapliga och tekniska utbildningar kan se ut.

Organisationerna är beredda att utöka sin verksamhet och föreslår därför att det ska införas en motsvarande finansiering, inom STEM-området, som den som nu är öronmärkt för organisationer som inspirerar och utbildar inom entreprenörskap. Dessutom lyfter de behovet av att här inkludera ett långsiktigt stöd till arrangerandet av internationella tävlingar inom området.

– Att i god tid få besked om en trygg statlig grundfinansiering är nödvändigt om vi ska våga oss på svenska världskap för olympiader och andra internationella tävlingar. Det är inte hållbart att vi bara är gäster, vi måste också kunna åta oss världskap om vi vill fortsätta delta i det internationella samarbete som vetenskapstävlingarna utgör, menar Hans Jakobsson.

ANNE-SOFIE MÅRTENSSON
Fysikaktuell

Lagen till EOES i Luxemburg är klara

■ European Olympiad in Experimental Science (EOES) är en lagtävling i naturvetenskap som riktar sig till högstadieselever och gymnasister upp till 17 år. Uttagningen sker individuellt, men på olympiaden tävlar man i tremannalag och laget som helhet behöver klara av att lösa experimentella uppgifter inom såväl biologi som kemi och fysik.

I Sverige genomförs en teoretisk uttagningstävling i november på de skolor som väljer att vara med, och de 27 elever som placerar sig bäst bjuds därefter in till en experimentell final på Vetenskapsens hus i Stockholm. Finalen arrangerades i slutet av januari och resulterade i att det i år är följande elever som får representera Sverige på EOES:

Olga Drapella, Nils Ericsonsgymnasiet, Trollhättan.

Ester Ekblad, Spyken, Lund.

Koen Ipsen, ProCivitas, Malmö.



FOTO: JONAS FORSHAMN

Finalisterna Nils Meerveld, Milo Hannerz och Melvin Westlund undersöker vattenflödets beroende av vattendjupet, årets fysikuppgift.

Adam Mehranrad, Engelbrektskolan, Stockholm.

Oliver Palmkvist, Berzeliuskolan, Linköping.

Eric Thorburn, Hitachigymnasiet, Västerås.

I år är det Luxemburg som är värd för olympiaden, som arrangeras i april. Men innan dess väntar en veckas träningsläger på Göteborgs universitet för de tävlande.

"En upplevelse långt över förväntan."

En av deltagarna om Lise Meitner-dagarna 2023.



FOTO: JOHANI MAURITSSON

Hundra gymnasister från hela landet på väg mot mer fysik under Lise Meitnerdagarna på AlbaNova i Stockholm.

Ännu ett lyckat år

Sista helgen i november arrangerades de nionde **Lise Meitner-dagarna** på AlbaNova i Stockholm med stor framgång.

De hundra deltagande gymnasieeleverna fick bland annat lyssna till intressanta föredrag om Vintergatan av Paul McMillan, om fysik inom hästsport av Maria Sundin och om aktivitet av Jeffrey Hangst. I samband med lunchpausen på fredagen informerade olika universitet om sina fysikutbildningar samtidigt som föreningar som Ung Vetenskapssport och Astronomisk ungdom visade upp vad de kan erbjuda.

Men de tre intensiva dagarna innehöll också engagerande interaktiva aktiviteter, bland annat laborationer på Vetenskapens Hus och experimentella tävlingsproblem från Wallenbergs fysikpris. Deltagarna fick även spela "Expedition Mundus" med Sveriges unga akademi, ett vetenskapsspel där eleverna fick utforska en ny värld med hjälp av vetenskapliga metoder.

Mot slutet av dagarna hölls en finmiddag på Hotell Birger Jarl där eleverna fick prova på lite av universitetslivet med sång, gyckel och mingel. I år underhöll Fysikalen, Fysiksektionens spexgrupp på KTH.

Låter detta intressant? Är du elev eller fysiklärare på gymnasiet? De tionde Lise Meitner-dagarna planeras i full fart och kommer äga rum i november 2024. Titta gärna in på vår webbplats (lisemeitnerdagarna.se) för mer information om innehållet och hur anmälan går till.

ROBERT ROSENQUIST
Arrangörgruppen för
Lise Meitner-dagarna 2023



FOTO: ROBERT ROSENQUIST

Jan Scheffel föreläste om både fusionsforskning och Lise Meitners banbrytande insatser inom kärnfysiken.



Under fredagens utställning passade föreningar och universitet på att informera om sin verksamhet.



Deltagarna löste, i grupper om tre, experimentella uppgifter från finaltävlingarna i Wallenbergs fysikpris.

Paranoida partikelmätare

Rymdsonden **Juice** har gett sig av på den långa färden till Jupiter. Många av de vetenskapliga instrumenten har slagits på och testats för första gången i rymden men vi väntar till nästa sommar innan vi genomför fullskaliga tester av vårt instrument.

Den 14 april 2023 lyfte den mäktiga Ariane 5-raketen från Kourou i Franska Guyana. Rymdsonden Juice (JUper ICy moons Explorer) gav sig iväg på sin åtta år långa resa mot Jupiter och de isiga månarna Europa, Ganymedes och Callisto. Svenska forskare är ansvariga för två av de tio mätinstrumentpaketen ombord och arbetet med instrumenten har pågått under mer än tio år innan uppskjutningen.

Ett av instrumenten som utvecklats

och byggts vid Institutet för rymdfysik i Kiruna är jon- och elektronspektrometern JDC (Jovian Dynamics and Composition Analyzer, se figur 1). Spektrometern är konstruerad speciellt för att kunna detektera positivt och negativt laddade joner samt elektroner i den tuffa strålningsmiljön som väntar kring Jupiter. Den är det mest komplexa instrument som vår forskargrupp någonsin byggt. Spektrometern kommer att mäta rörelseriktningen, energin och massan på partik-

larna. Den består av flera filter som gör att partiklarna bara kan ta sig hela vägen till detektorn ifall de kommer från den riktning och har den energi som filtren ställts in för. Genom att stegvis ändra inställningarna får man instrumentet att titta i olika riktningar och "svepa" över ett visst energiintervall.

Filtren och detektorerna använder starka elektriska fält för att styra partiklarna och det innebär spänningar på upp till 5 kV. Eftersom spektrometern är väldigt kompakt byggd är det viktigt att förvissa sig om att det inte kan ske elektriska överslag någonstans. Ett enda överslag kan förstöra instrumentet och omöjliggöra fortsatta mätningar, så det är lätt att bli lite paranoid.

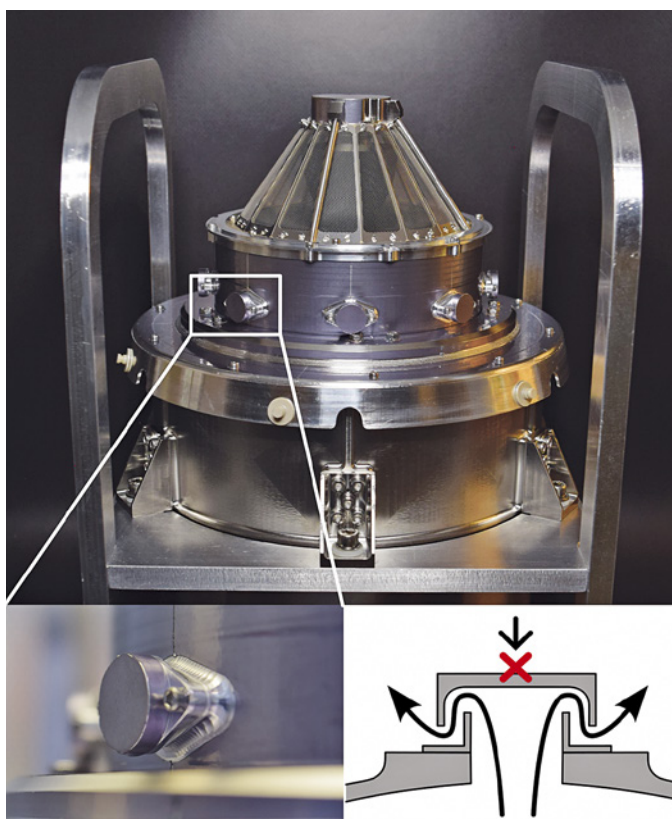
DEN SPÄNNING SOM LEDER till ett överslag bestäms av trycket och avståndet mellan de spänningsförande delarna enligt den så kallade Paschenkurvan, uppkallad efter den tyske fysikern Friedrich Paschen som upptäckte den experimentellt 1889. Den typiska sträcka som en fri elektron kan röra sig innan den kolliderar med en atom kallas fria medelväglängden (λ). Om trycket är högt är den fria medelväglängden kort, men när trycket minskar blir den längre och längre. λ är proportionell mot T/p , där T är gasens temperatur och p trycket. Vid rumstemperatur och normalt lufttryck är λ för en elektron ungefär $0,7 \mu\text{m}$.

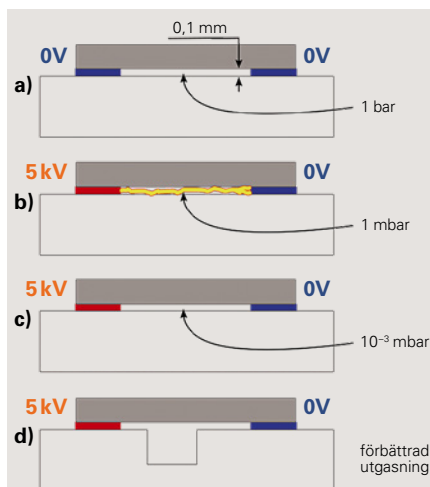
Om λ är lång och elektronen befinner sig i ett elektriskt fält kan den accelereras till hög hastighet. Om elektronens energi blir tillräckligt hög kan den då

FIGUR 1

Spektrometern JDC. Instrumentet är bara den cylindriska delen men det är monterat på en ram med bågar för att man lättare ska kunna hantera det.

På spektrometern finns många "utgasnings-svampar" (nere till vänster) för att trycket ska sjunka snabbare inuti. Ett snitt genom en svamp (nere till höger) visar hur luften lätt kan komma ut (svarta pilar) medan ljus och partiklar utifrån får svårt att komma in (rött kryss).





FIGUR 2 a) En problematiskt smal spalt med luft i vid uppskjutningen. b) Efter uppskjutningen sjunker trycket i spalten men om man slår på högspänningen för tidigt blir det ett elektriskt överslag som förstör instrumentets elektronik. c) Om man väntar väldigt länge blir trycket tillräckligt lågt. d) Om man gör spalten större, så sjunker trycket mycket snabbare.



FOTO: ESA/IRBUS

Var är Juice just nu?

Följ rymdsondens färd på www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Juice/Where_is_Juice_now

FIGUR 3 Spektrometern (övre delen av bilden, i mitten) monterad på rymdsonden Juice innan uppskjutningen. Philipp Wittmann, som jobbat med JDC under drygt fyra år som doktorand, säger hej då och lycka till på färden.

slå ut fler elektroner från de atomer som den till slut kolliderar med. De nya fria elektronerna kan i sin tur skapa nya fria elektroner då de träffar på en atom. En elektronkaskad uppstår – ett elektriskt överslag sker. När trycket sjunker ökar alltså risken för överslag, men om trycket blir ännu lägre minskar risken igen. Med färre och färre atomer som elektronerna kan kollidera med blir det svårt att få till en elektronkaskad. Det tryckområde där risken för överslag är störst kallas *Paschenminimat*. För luft vid rumstemperatur är det 1–2 mbar.

NÄR JUICE SKJUTITS UPP i rymdens vakuum började all luft som fanns inuti den flöda ut och trycket inuti rymdsonden och alla dess instrument började minska. Innan vi slår på högspänningarna i vår spektrometer vill vi vara helt säkra på att trycket är mycket lägre än *Paschenminimat* överallt så att inga överslag kan ske. Problemet är de små fickor och spalter som finns på många ställen (figur 2). I början sjunker trycket inuti dem snabbt, men när den fria medelväglängden för atomerna i gasen är lika

lång som storleken på fickan eller spalten går det mycket långsammare. Atomerna studsar då bara mellan väggarna tills de råkar träffa en öppning och kan ta sig ut. Det är en ineffektiv process och trycket kommer i fortsättningen att sjunka väldigt långsamt.

Om spaltjockleken är 2 mm inträffar den här övergången vid ungefär 0,03 mbar, vilket är långt under *Paschenminimat*. För tillräckligt stora inre volymer uppstår alltså inget problem, men i de riktigt små fickorna är situationen annorlunda. För en spaltjocklek på 0,1 mm inträffar övergången vid ungefär 1 mbar vid rumstemperatur, alltså precis kring *Paschenminimat* där överslagen är som mest troliga.

I vår spektrometer finns många små utrymmen som är precis 0,1 mm stora. För att vara säkra på att trycket i dem är tillräckligt lågt skulle vi behöva vänta tio år – men då är hela Juice-expeditionen redan över.

DESSBÄTTRE INSÅG VI PROBLEMET långt innan uppskjutningen och kunde göra förändringar i konstruktionen av instru-

mentet. Där det var möjligt gjorde vi de små utrymmena lite större (se nedersta panelen i figur 2). Helst skulle vi ha gjort stora hål i instrumentet där gasen skulle kunna strömma ut men det går inte. UV-ljus och högenergipartiklar (som inte ska mätas) måste hållas borta från detektorerna.

Lösningen blev istället en labyrintkonstruktion som ser ut som en svamp (nedre delen av figur 1). Vårt instrument ombord på Juice är utrustat med ett stort antal sådana svampar. Trots det tar utgasningen lång tid och vi är extremt försiktiga så vi kommer att vänta till Juice tillbringat mer än ett år i rymden innan vi slår på högspänningarna. Under väntetiden värmer vi instrumentet. Då ökar trycket inuti och utgasningen går snabbare. Det kallas för "bakeout".

Visst är vi lite otåliga, men till sommaren kommer vi antligen att för första gången kunna provköra vår spektrometer i rymden!

GABRIELLA STENBERG WIESER,
MARTIN WIESER OCH PHILIPP WITTMANN
Forskare, Institutet för rymdfysik

Framsidan av Elisabettas avhandling är en "van Gogh-målning" baserad på neutron-spridningsdata.

AVHANDLINGEN

På spaning efter den symmetri som brutits

Inom det experimentella fasta tillståndets fysik finns starka kopplingar mellan ett materials strukturella symmetri och dess fysik. I sin avhandling undersökte **Elisabetta Nocerino** symmetribrytande fenomen i kristaller, supraledare och magneter.

”[Natures bok] är skriven på matematikens språk. Bokstäverna är trianglar, cirklar och andra geometriska figurer, utan vilka det är mänskligt omöjligt att förstå ett ord; utan dessa vandrar mänskligheten fåfängt genom en mörk labyrint.”

Så beskrev Galileo Galilei geometrins betydelse för mänsklighetens försök att förstå principerna bakom hur naturen fungerar i sin pamflett ”Il Saggiatore” (ung. ”Utvärderaren”, 1623, skriften finns inte på svenska). Tanken att geometrin skulle vara naturens språk fick en mer komplex innebörd när F. Klein i sitt Erlangen-program (1872) introducerade den revolutionära idén att varje geometri kan beskrivas som en studie av de egenskaper som inte varierar under en viss grupp av förändringar (det vill säga *symmetrier*). Sett på det viset kan symmetri och geometri betraktas som utbytbara koncept, eftersom symmetri i princip definierar geometri. Att fastställa den geometriska principen om symmetri (*invariants*) fick en grundläggande betydelse inom fysiken. Sökandet efter transformationer under vilka ett system inte förändras visade sig kunna förenkla problem som annars inte skulle gå att lösa.

A Comprehensive Experimental Approach to Multifunctional Quantum Materials and their Physical Properties

- Författare: Elisabetta Nocerino
- KTH, School of Engineering Sciences (SCI), Applied Physics, Materials and Nanophysics, 2022
- ISBN: 978-91-8040-420-4
- Länk till avhandlingen: kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1713829/FULLTEXT01.pdf
- Handledare: Martin Månsson, universitetslektor, KTH, Yasmine Sassa, universitetslektor, KTH.
- Opponent: Stephen Blundell, professor, University of Oxford



Kleins revolution av geometrin kan sägas ha direkt lett till framträdande framsteg inom modern fysik. Från Albert Einsteins speciella och allmänna relativitetsteori till Emmy Noethers sats om symmetrier och konserveringslagar som, tillsammans med det geometriska angreppssättet i den hamiltonska mekaniken, utgör grunden för den formaliserade kvantmekaniken. På så sätt gick utvecklingen från Hermann Weyls försök att få ihop elektromagnetism och allmän relativitetsteori, till formuleringen av geometribaserad gauge-teori, som ledde till födelsen av partikelfysikens standardmodell.

MIN AVHANDLING RÖR SIG inom ramarna för experimentell fasta tillståndets fysik. Här är ett systems strukturella symmetrier och dess fysik intimt sammanflätade, och ett materials kristallstruktur bestämmer det mesta av dess fysiska egenskaper, som H. A. Bethe och J. H. Van Vleck visat i sin teori om kristallfält. Det kan sägas att den fysik som styr ett materials fasta

tillstånd har sitt ursprung i materialets kristallgitter, där de starka, kollektiva interaktionerna mellan de tätt packade elektronerna och kärnorna så småningom resulterar i de framträdande fysiska egenskaper vi kan observera i en så kallad *fas*. En transformation som förändrar ett fysiskt systems tillstånd – vilket kan innefatta en mängd olika egenskaper, som till exempel kristallstruktur, densitet, magnetisering och elektrisk ledningsförmåga – kallas för en fasövergång.

Ett system som uppvisar en kontinuerlig fasövergång sägs ha ett *spontan symmetribrott* när dess grundtillstånd har en lägre symmetri än dess Hamiltonoperator¹. Detta innebär att den totala symmetrin av systemets underliggande fysikaliska lagar (till exempel invariansen av dess Hamiltonoperator med avseende på dess transformationer) bevaras, medan systemets möjliga grundtillstånd förlorar symmetri. Med symmetribrott kan man avse diskret symmetri (som till exempel symmetri genom reflektion) eller kontinuerlig symmetri (som translationell symmetri eller rotationssymmetri). Vid övergångar av den senare typen (där man kontinuerligt går från ett tillstånd till ett annat utan energiförlust) kan en ny, skalär partikel utan massa uppstå i systemets excitationsspektrum för varje symmetriskapande egenskap som bryts. Adjektivet ”spontan” innebär här att systemet efter fasövergången spontant väljer sitt grundtillstånd bland alla de möjliga grundtillstånden. I min avhandling utforskade jag den typ av symmetribrytande fenomen (och därmed följande excitationer) som förekommer i kristaller, supraledare och magneter. Här beskriver jag de som, enligt mig, gett de mest anmärkningsvärda resultaten.

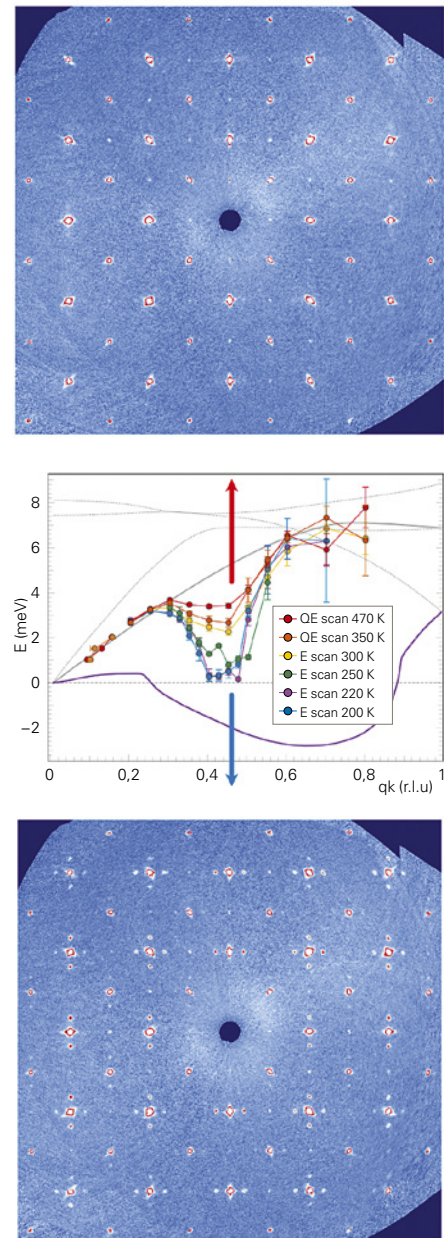
EFTERSOM KRISTALLERS GITTER utgör en väldefinierad struktur av atomer (vilket gör dem ordnade men inte symmetriska) och det finns gränsvillkor längs deras ytor, så kommer translationella symmetribrott att förekomma. Som en konsekvens av detta skapas *fononer*. Dessa

är kvantiserade vibrationsrörelser hos atomerna, som förskjuts en sträcka $U(x)$ i en viss riktning kring sin jämviktsposition. Laddningsdensitetsvågor (CDW, *charge density waves*) som uppstår vid växelverkan mellan elektroner och kristallens gitter leder dessutom till en extra, spontan variation av den ursprungliga kristallstrukturen (som ofta är otillräcklig), som bryter den enhetliga symmetrigruppen $U(1)$. Denna grupp styr det elektromagnetiska fältets symmetri, det till säga: Maxwells ekvationer är invarianta när $U(1)$:s beståndsdelar förändras.

Eftersom det underliggande gittret och den CDW-inducerade, otillräckliga, gitterdistorsionen är godtyckligt ”ur fas” med avseende på varandra säger vi att $U(1)$ -symmetrin är bruten. Som ett resultat av detta får vi en fas-excitation, samtidigt som fonon-frekvenserna i systemets vibrationsexciters-spektrum åter normaliseras.

I MIN AVHANDLING undersökte jag strukturell instabilitet och fonon-spektrum för att reda ut de ovanliga dragen hos laddningsdensitetsvågen hos supraledaren LaPt_2Si_2 (figur 1). Mekanismerna bakom okonventionell supraledning har varit en central del av den vetenskapliga debatten inom modern fysik. Att klargöra den underliggande supraledande mekanismen för material som har konkurrerande ordningar (det vill säga laddnings-/spindensitetsvågor) kan i detta sammanhang vara av mycket stor betydelse för att förstå och konstruera supraledning vid rumstemperatur.

LaPt_2Si_2 uppvisar starkt samspel mellan CDW och supraledning. Materialet kännetecknas av en struktur av CaBe_2Ge_2 -typ, som liknar den som vanligen hittas i supraledare i kvävegruppen, samtidigt som det är ett mycket mindre komplext system, som inte har de ytterligare, konkurrerande ordningar som är typiska för järnbaserad supraledning (till exempel magnetism, spindensitetsvågor och nematicitet). Detta gör LaPt_2Si_2 till ett perfekt studieobjekt för att få en tydlig förståelse för relationerna mellan CDW och supraledning i högttemperatursupraledare, och föreningen studeras av den anledningen flitigt.

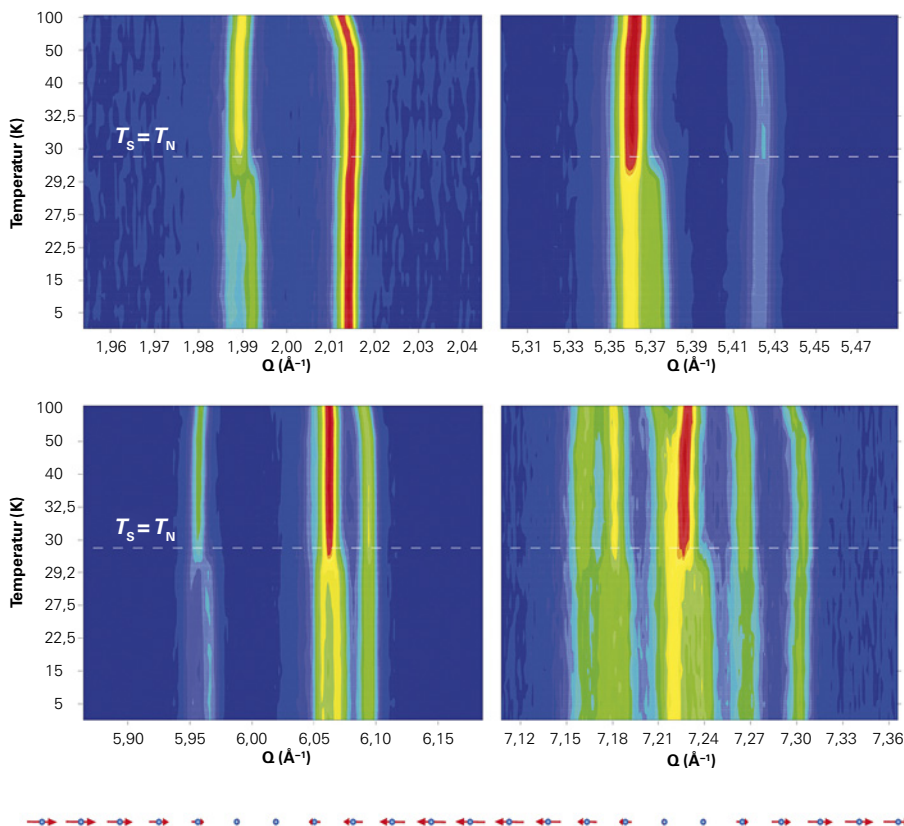


FIGUR 1 Röntgendiffraktionsmönster och fonon dispersionsrelationer för enskilda kristaller av LaPt_2Si_2 vid olika temperaturer. När den uppmjukning av fononen som hjälper CDW-övergången i det här materialet inträffar (det vill säga när fononen kollapsar vid sjunkande temperatur) sker en modulering av kristallstrukturen (nära de stora fläckarna i diffraktionsmönstret uppstår ytterligare små fläckar).

FIGUR ANPASSAD FRÅN E. NOCERINO, ET AL. "Q-DEPENDENT ELECTRON-PHONON COUPLING INDUCED PHONON SOFTENING AND NON-CONVENTIONAL CRITICAL BEHAVIOR IN THE CDW SUPERCONDUCTOR LaPt_2Si_2 ," JOURNAL OF SCIENCE: ADVANCED MATERIALS AND DEVICES 8.4 (2023): 100621.

På grund av feltolkningar av tidigare rapporterade röntgen- och interna volymkaraktäriserings-mätningar har högttemperaturfysiken för den här föreningen ►

¹ Hamiltonoperatören representerar ett fysikaliskt systems energi, och består av summan av systemets kinetiska och potentiella energi.



FIGUR 2 Temperaturberoende hos topparna i diffraktionsmönstret för neutroner hos ett pulverprov av LiCrSe_2 , med en schematisk framställning av dess spin-struktur som visar den rörliga frustrationen hos det magnetiska momentet hos Cr. Man kan se att vid 30 K, vilket motsvarar temperaturen för den magnetiska övergången, delar sig flera av topparna i mönstret, vilket visar på en strukturell övergång med en stor symmetriförlust hos kristallsystemet.

FIGUR ANPASSAD FRÅN E. NOCERINO, ET AL. "COMPETITION BETWEEN MAGNETIC INTERACTIONS AND STRUCTURAL INSTABILITIES LEADING TO ITINERANT FRUSTRATION IN THE TRIANGULAR LATTICE ANTIFERROMAGNET LiCrSe_2 ". COMMUNICATIONS MATERIALS 4.1 (2023): 81.

► – och till och med själva existensen av ett CDW-tillstånd – debatterats och vi förstår fortfarande inte mekanismerna för supraleddning vid låga temperaturer. Den publicerade forskningen om LaPt_2Si_2 är i själva verket motsägelsefull, tvetydig och oförmögen att ge en tydlig bild av hur dess CDW- och supraleddande faser ser ut.

Våra undersökningar gav den första experimentella observationen av de renormeringar av fononer i LaPt_2Si_2 som förutsetts teoretiskt. De avslöjade också en komplex, temperaturberoende omstrukturering av kristallstrukturen när CDW-tillståndet utvecklas, vilket antyder att två okonventionella CDW-faser samexisterar i Pt-lagren (det vill säga att laddningsdensitetsvågorna är osymmetriska). Våra resultat löste alltså debatten kring relationerna mellan struktur och egenskaper i LaPt_2Si_2 , och öppnade för mer menings-

fulla teoretiska och experimentella undersökningar av det supraleddande tillståndet i detta material.

NÄR DET GÄLLER MAGNETER uppstår ett spontant rotationssymmetribrott tillsammans med ett translationellt symmetribrott på grund av ändringar i den magnetiska cellens rumsliga periodicitet i relation till atomkärnan. Brottet i den kontinuerliga rotationssymmetrin innebär att magnetiska excitationer av *spinnvågor* och spontan magnetisering uppstår (det vill säga att atomernas elektroniska moment organiseras i ett ordnat tillstånd). Det senare väljer att orientera sig längs en viss riktning vid en sänkning av temperaturen, vilket ger systemet ett ordnat grundtillstånd.

I den här avhandlingen undersökte vi flera okonventionella och lågdimen-

sionella magneter, men det tydligaste exemplet ges av (2D-TLA) LiCrSe_2 , en tvådimensionell $S = \frac{3}{2}$ antiferromagnet ($S = \text{spinn}$) med triangulärt gitter. 2D-TLA-magneter är väldigt intressanta, eftersom de ofta uppvisar spännande fysikaliska beteenden och har attraktiva teknologiska egenskaper (till exempel magneto-elektriska effekter). Dessa beror på ett starkt samspel mellan deras gittergeometri och elektrontäthetens fördelning. Teoretisk modellering av $S = \frac{3}{2}$ -system är dessutom mycket svårare än de ideala $S = \frac{1}{2}$ -systemen, vilket gör experimentella studier på riktiga material helt avgörande för att förstå fysiken i $S = \frac{3}{2}$ -system. Bland dessa studeras sällan föreningar av typen ACrX_2 , där A är en atom med valensen 1 och X är något av de kalkogena ämnena Se eller Te, eftersom de är svåra att framställa.

VÅRA EXPERIMENT VISAR ATT unika förhållanden uppstår mellan de strukturella frihetsgraderna och de konkurrerande magnetiska kopplingarna i LiCrSe_2 , vilket leder till en omstrukturering av kristallgittret. Denna följs av bildandet av en komplex, inkommensurabel upp-upp-nerner magnetisk struktur, med rörlig geometrisk frustration och periodisk omorientering av det magnetiska momentet för Cr (figur 2). Det här är unikt bland de kända 2D-TLA-ämnena. Teoretiska beräkningar från 2022 förutser den anmärkningsvärda förekomsten av topologiska spinn-texturer i LiCrSe_2 som går att justera utan att tillföra ett yttre magnetfält, vilket gör materialet till en intressant kandidat för tillämpningar i spinntronik-kretsar.

Att förstå kristall- och magnetstrukturerna vid låga temperaturer hos LiCrSe_2 är ett avgörande steg för de grundläggande studierna av magnetisk excitation i spinn $\frac{3}{2}$ -system, och för framtida tekniska tillämpningar.

ELISABETTA NOCERINO

Institutionen för material- och miljö kemi,
Stockholm University (Sverige)
Applied Materials Group,
Paul Scherrer Institut (Schweiz)

Översättning: Christina Kjellstrand



TILL VÄNSTER

Elisabetta Nocerino har bland annat dansat balett.

TILL HÖGER

Elisabetta instruerar en student under experiment med inelastisk neutronspredning vid Paul Scherrer Institut i Schweiz.

En dansande neutronforskare

Vare sig det gäller materialfysik eller dans drivs **Elisabetta Nocerino** av en ständig nyfikenhet på världen, och för henne verkar nya idéer dyka upp mest hela tiden.

Elisabetta Nocerino försvarade sin doktorsavhandling i Stockholm 19 december 2022 med bravur. Hennes avhandling belönades också med priset "Young Scientist Prize of the Swiss Neutron Science Society", för bästa avhandling i neutronforskning i Schweiz (sgn.web.psi.ch/sgn/young_scientist_prize.html).

Mitt samtal med henne gav mig intrycket av en mycket driven och levnadsglad ung dam, som står fast med fötterna på jorden och samtidigt kan – både vetenskapligt och personligt – beskriva sin målsättning: att vara och fortsätta vara en mycket duktig forskare som ser olika behov i samhället.

MEN HENNES VÄG till detta mål var alls inte rak. Elisabetta föddes i Neapel i Italien och bodde där under sin uppväxt och studietid, tills det var dags att tänka på framtiden.

Hon visste att hon ville fortsätta studera, och hon ville utvidga sin levnadsfär. Det verkade inte finnas några begränsningar i hennes idéer vad som skulle kunna bli en framtid för henne. Dessutom

hade hon även träffat sin tvillingsjäl, Marco, som också var redo att utforska världen och livet. Så de båda började söka efter doktorandstudier i andra länder, och Elisabetta kom till slut till Sverige. Här hade hon valts ut av Stiftelsen för Strategisk Forskning som en av deltagarna i en nystartad grupp av doktorander med målet att i framtiden arbeta som forskare vid neutronfaciliteten ESS i Lund.

Elisabetta började sina studier och hittade ett boende, ett rum och kök i Vällingby. Doktorandstudierna innebar att hon reste runt om i världen för att utnyttja de internationella neutronforskningsfaciliteter som finns tillgängliga, i Japan, England, Schweiz, Tyskland, Kanada, USA och Frankrike. Under tiden lyckades även Marco komma till Stockholm och KTH. De båda insåg att för att få leva tillsammans vore ett giftermål det bästa, så under pandemin blev det snabbt ett enkelt bröllop i Stockholm. Och vid vårt samtal var Elisabetta lycklig över att de två hittat ett lämpligare boende än ettan i Vällingby.

NU HAR HON FORMULERAT ett framtida forskningsprojekt som handlar om att få fram nya isoleringsmaterial som lämpar sig i vårt framtida samhällsbygge.

Nytänkande kring isolering är ett område inom materialfysiken som redan rönt stor framgång, och Elisabetta ska nu börja

undersöka nya material vid neutronforskningsanläggningen PSI (Paul Scherrer Institut) i Schweiz. För att komma fram till detta projekt har hon vidgat sitt forskningssamarbete, från fysik till kemi, för att kunna få fram de egenskaper nya funktionsdugliga isoleringsmaterial kommer att krävas.

För henne verkar nya idéer komma mest hela tiden, idéer som hon tar vara på och verkställer, som att kontakta nya forskningsgrupper, att förklara för dessa för henne okända forskare vad som kan göras och få alla attraherade och entusiastiska av hennes forskningsidéer.

OCH VEM BLIR INTE NYFIKEN på Elisabetta? Hon var dansös i skolan i Italien, och har fortsatt med dansen under hela livet, även om forskningen nu tar större plats. I dansen har hon gått från en liten flicka i klassisk balett till "hoofing" här i Stockholm, det vill säga stepdans à la Astaire.

Jag ville gärna be henne visa mig där vi satt i AlbaNovas entré och pratade! Men hon kunde beskriva det så levande att vi båda dansade vidare i vårt samtal. Och jag tänkte, vilken härlig forskarsjäl som sitter framför mig.

Lycka till Elisabetta!

ELISABETH RACHLEW
Professor emetita, KTH



Jönköpingsgymnasium vinnare i skoltävlingen

Även i år var det ett nytt gymnasium som klev upp överst på prispallen i **Wallenbergs fysikpris**: Erik Dahlbergsgymnasiet i Jönköping. Det vinnande laget bestod av Leopold Grinnemo, Lucas Johansson och Axel Eklund som tillsammans plockade ihop imponerande 80 av 90 möjliga poäng.

Torsdagen i vecka 5 ägde uttagnings-tävlingen i Wallenbergs fysikpris rum, i år precis som tidigare. Tävlingen består av sex teoretiska uppgifter som löses individuellt under fem timmar, och de arton elever som får bäst resultat erbjuds att gå vidare till finaltävlingen. Men samtidigt adderas resultaten från de tre bästa eleverna på varje skola för att avgöra vilka skolor som placerar sig bäst, och i år var det alltså Erik Dahlbergsgymnasiet i Jönköping som knep förstaplatsen.

PÄR ALDERHAMMAR, kontaktlärare på Erik Dahlbergsgymnasiet, var mycket nöjd och glad när han fick reda på resultatet och svarar så här på frågan om varför det blev ett så fint resultat för skolan i år:

– Vi fysiklärare vid Erik Dahlbergsgymnasiet har under många år strävat

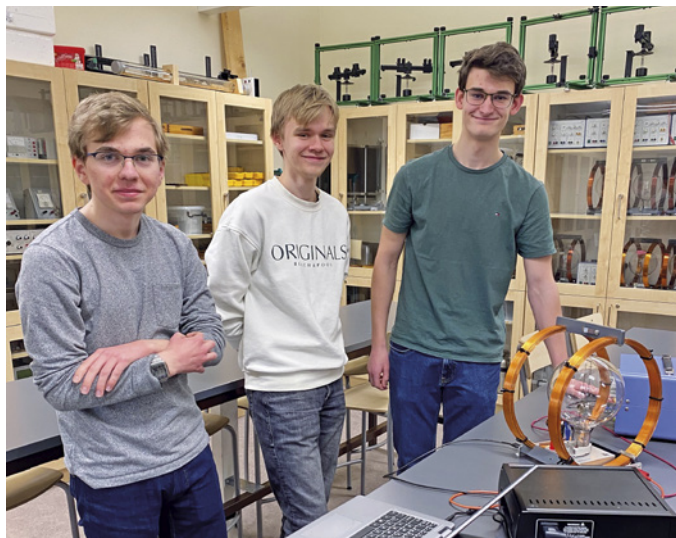


FOTO: PÄR ALDERHAMMAR

Vinnande skollaget 2024 på plats i Erik Dahlbergsgymnasiets fysiklab, från vänster Axel Eklund, Lucas Johansson och Leopold Grinnemo.

efter att hålla en hög kvalitet på fysikundervisningen. I ämneslaget arbetar vi för att få alla elever att lyckas utifrån sina förutsättningar. Skolans fysikinstitution är välutrustad och lärarna är mycket nyfikna på att utveckla ämnet. Alltsedan Gy11-reformen har skolan haft kursen Fysik 3 där gruppstorleken genom åren har varierat mellan 20 och 30 elever. I den kursen har även de som har ett extra stort intresse för matematik och fysik kunnat bli utmanade på ett bra sätt.

Pär Alderhammar fortsätter:

– Att vi i år har uppnått så bra resultat beror på att vi haft en elevgrupp som har haft en särskilt stor passion för fysiken. Eleverna har arbetat hårt och har varit fokuserade på att nå sina mål. Som fysiklärare har vi helt enkelt försökt stötta dem. I Fysik 3-kursen läggs cirka två veckor på arbete med tidigare givna

tävlingsuppgifter i Wallenbergs fysikpris och eleverna arbetar gruppvis med dem. Det är en viktig del. Eleverna får chans att träna på djupare och mer komplexa uppgifter än i den vanliga fysikundervisningen. Målet är att lösa uppgifter i grupp, men även att förklara lösta uppgifter för andra. Det är en bra erfarenhet att ta med sig till vidare studier. Utöver det arbetar intresserade elever vidare på egen hand och tar hjälp av lärare vid behov.

LEOPOLD GRINNEMO, Lucas Johansson och Axel Eklund utgjorde laget som tog hem förstapriset i skoltävlingen till Erik Dahlbergsgymnasiet. De håller med om att tävlingsuppgifterna är roligare att arbeta med än de som vanligen används i undervisningen:

– Det är mycket mer intressant när man måste tänka till lite extra! ►

Vinnande skolor 2024

1	Erik Dahlbergsgymnasiet, Jönköping	80 p
2	Europaskolan, Strängnäs	79 p
2	Södra Latins gymnasium, Stockholm	79 p
4	Danderyds gymnasium, Danderyd	75,5 p
4	Polhemskolan, Lund	75,5 p
6	Uddevalla gymnasieskola, Uddevalla	74 p
7	Katedralskolan, Lund	72 p
8	Katedralskolan, Växjö	70 p
9	Kitas gymnasium, Göteborg	67 p
10	Berzeliuskolan, Linköping	62 p
10	Viktor Rydberg gymnasium, Stockholm 62	62 p

Årets uppgifter: Puck & power på problemlistan

■ Uttagningstävlingen till Wallenbergs fysikpris består av sex teoretiska uppgifter som var och en kan ge maximalt 5 poäng. I år var det Lage Hedin, Ulf Jonasson, Niklas Malmgren, Gunnar Ohlén, Fredrik Olsson och Susanne Tegler som komponerat tävlingsuppgifterna, och som vanligt skulle både vardagsnära och mer exotiska frågeställningar besvaras: Hur stor är vilofriktions-koefficienten mellan en sliten träningssko och golvet, hur varm blir en elgrill när den körs på full effekt och vilken temperatur har frysen enligt mätdata hämtade med

hjälp av en Wheatstonebrygga? Dessutom uppmärksammades vinterns Nobelpris till Anne L'Huillier i en uppgift som utgick från ett av hennes första experiment.

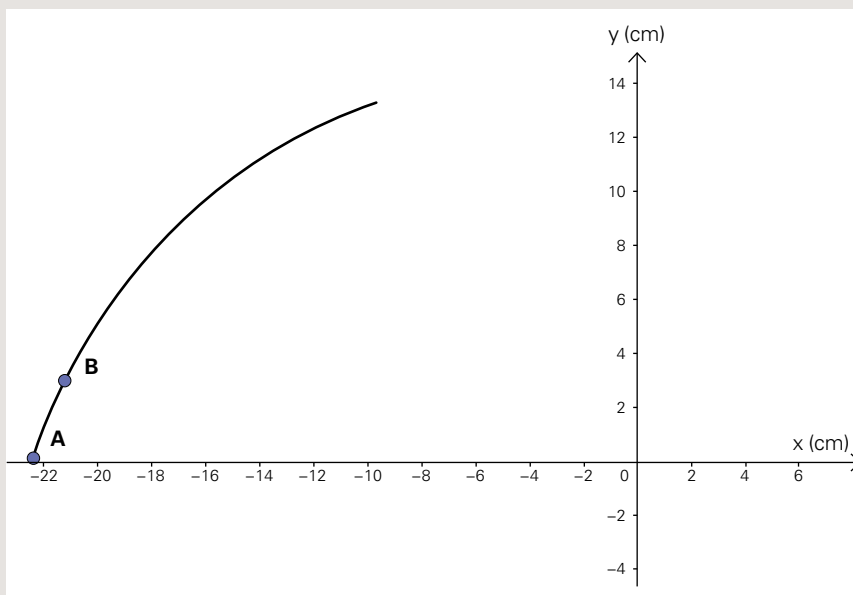
Två av uppgifterna visas nedan i sin helhet. I den första ska man bestämma hur stor "stopping power" alfapartiklar träffar på när de hamnar i en dimkammare, och i den andra gäller det att sikta rätt för att styra in en hockeypuck i mål.

Lösningar till uppgifterna finns publicerade på vår hemsida, www.fysikersamfundet.se.

Uppgift 3: Stoppkraft

■ I en dimkammare observeras alfastrålning som spår av "dimma". Då man placerar ett magnetiskt fält med fältstyrkan 2,0 T vinkelrät mot spåret så kröker alfapartiklarna av, se figur. Krökningsradien minskar på grund av att alfapartiklarnas hastighet minskar. Med noggranna mätningar bestäms krökningsradien till 22,5 cm alldeles i början av banan (vid punkt A) och 21,2 cm lite längre bort (vid B).

För att beskriva hur en alfapartikel avger sin energi definieras dess "stopping power" enligt $\Delta E/\Delta x$ där ΔE är den avgivna energin och Δx är den avverkade sträckan. Bestäm "stopping power" för alfapartiklarna i dimkammaren vid den energin alfapartikeln har alldeles i början av banan.

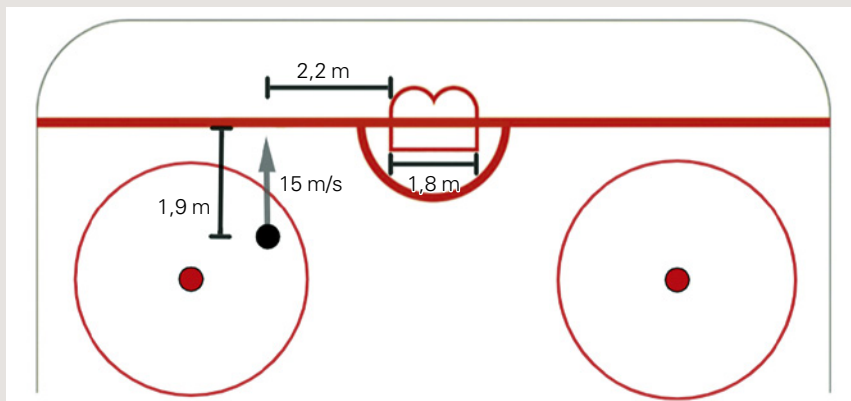


Figuren visar ett spår i en dimkammare som börjar vid punkten A.

Uppgift 4: Pucken i mål

■ En ishockeypuck åker med hastigheten 15 m/s rakt mot förlängda mållinjen när den får en snabb stöt av en klubba. Pucken väger 160 g och får en impuls av klubban på 2,16 Ns. Den korta kontakten mellan puck och klubba sker 1,9 m framför den förlängda mållinjen och 2,2 m till vänster om vänstra stolpen (se bild).

Hur måste impulsen från klubban vara riktad för att pucken skall träffa målet som är 1,8 m brett?





► Tävlingsuppgifterna är roliga, med deras variation och lite större omfång än de som annars förekommer i fysikundervisningen. Jämfört med förra året kändes uppgifterna enklare i år, men det kan också bero på att vi har lärt oss mycket sedan dess.

Fysiken fascinerar dem genom den täta sammanlänkningen till matematik och hur väl matematiken beskriver så många fysikaliska fenomen:

– Där finns ordning, struktur och logik. Dessutom gillar vi att fysiken beskriver vår omgivning så att det finns så många konkreta, praktiska tillämpningar.

ANNE-SOFIE MÅRTENSSON
Göteborgs universitet

Finalister 2024

1	Teo Alvånger , Rymdgymnasiet, Kiruna	29 p
1	Markus Farnebäck , Berzelius-skolan, Linköping	29 p
1	Leopold Grinnemo , Erik Dahlbergsgymnasiet, Jönköping	29 p
4	Åke Amcoff , Södra Latins gymnasium, Stockholm	28,5 p
4	Jacob Brzezinski Ädelroth , Danderyds gymnasium, Danderyd	28,5 p
4	Lily Skelton Kockum , Södra Latins gymnasium Stockholm	28,5 p
7	Lucas Johansson , Erik Dahlbergsgymnasiet, Jönköping	28 p
7	Jiachen Mi , Katedralskolan, Lund	28 p
7	Jack Elliot Collier Ryder , Minerva Gymnasium, Umeå	28 p
10	Lucas Masus , Europaskolan, Strängnäs	27 p
10	Hugo Nylander , GTG, Göteborg	27 p
12	Alvar Forsling , Möckelngymnasiet, Karlskoga	26 p
12	Sixten Lindhagen , Rosendalsgymnasiet, Uppsala	26 p
12	Elving Lomander , Uddevalla gymnasieskola, Uddevalla	26 p
12	Leonard Nordberg , Europaskolan, Strängnäs	26 p
12	Alvin Sundberg , Uddevalla gymnasieskola, Uddevalla	26 p
12	Carl Wallin , Europaskolan, Strängnäs	26 p
18	Mostafa Kerim , Polhemskolan, Lund	25,5 p

Finalister från Lund till Kiruna

I år var det hela 496 elever som deltog i **uttagningstävlingen** och det krävdes ett rekordhøgt resultat, 25,5 poäng för att ta sig in bland de 18 finalisterna.

Allra bäst resultat, 29 poäng av 30 möjliga, fick Teo Alvånger från Rymdgymnasiet i Kiruna, Markus Farnebäck från Berzeliuskolan i Linköping och Leopold Grinnemo från Erik Dahlbergsgymnasiet i Jönköping.

Snabb och smidig rättning

När tävlingstiden runnit ut skannar ansvariga lärare på skolorna in alla elevlösningar och skickar in dem för central bedömning. Rättningen sker sedan första lördagen i februari när ett trettio-tal fysiklärare samlas i Göteborg för att ge sig i kast med poängsättningen. Totalt var det i år 2077 lösta uppgifter som skulle bedömas, och arbetet sker i grupper som bedömer en uppgift var. Alla resultat sammanställs automatiskt i ett program som tagits fram av Susanne Tegler, fysiklärare på Spyken i Lund, som samfällt hyllas för att allt gick så smidigt.

Något som uppskattas under rättningssdagen, förutom umgänget med kollegor, är att få syn på vilka missuppfattningar som finns hos eleverna. Ann-Marie Pendrill, tidigare föreståndare på Nationellt resurscentrum för fysik, var med i gruppen som bedömde den sista uppgiften som gällde temperaturmätning i en frysk med hjälp av en så kallad Wheatstonebrygga. Denna resistansmätningssmetod tas vanligen inte längre upp i gymnasiet och det märktes under rättningen:

– Det var 330 elever som hade gett sig på den sista uppgiften, men av dem fick 205 noll poäng. Omkring hälften av dem som fick noll poäng hade antagit att den totala resistansen skulle vara lika stor på båda sidor i bryggan, andra tänkte genast "parallellkoppling" när de såg kretsen och började räkna ut ersätt-

ningsresistans. Några gick baklänges och antog att en frysk ska hålla cirka -18°C .

Men hela 53 elever fick ändå full pott på denna den sista uppgiften, ett ovanligt bra resultat. Överlag var det många poäng som delades ut under rättningen och medelpoängen landade på 10,4 poäng.

Från Göteborg via Tallinn till Kutaisi

För finalisterna väntar nu först en "fysikvecka" i mitten av mars. Det är Fysikcentrum i Göteborg som tar emot med ett program med studiebesök, föreläsningar, experimentell träning samt en första finaltävling där det gäller att visa sina experimentella färdigheter. Till fysikveckan bjuds även sex "VIP-tjejer" in utom tävlan i en satsning på att få fler flickor att delta i tävlingen. Det är tjejer från årskurs 2 som deltagit i tävlingen och nått fina resultat som på detta sätt kan få en extra peppning inför nästa års tävling, något som brukar vara mycket uppskattat.

Därefter är det i slutet av april dags för den nordisk-baltiska fysikolympiaden i Tallinn, en olympiad som alla de svenska finalisterna deltar i. Den är dels en tävling i sig, men också den avslutande delen av finalen i Wallenbergs fysikpris och det är den sammanlagda poängen från Göteborg och Tallinn som bestämmer placeringen i Wallenbergs fysikpris.

De fem som placerat sig bäst erbjuds sedan att i juli representera Sverige på den europeiska fysikolympiaden, som i år arrangeras i Kutaisi i Georgien. I år kan vi tyvärr inte delta med något lag i den internationella fysikolympiaden eftersom den arrangeras i Iran som UD avråder resor till.

Ett varmt tack till Stiftelsen Marcus och Amalia Wallenbergs Minnesfond som finansierar uttagningstävlingen och tillsammans med Skolverket gör det möjligt för oss att delta i olympiaderna.

ANNE-SOFIE MÅRTENSSON

Enorma precisionsmätningar



Vid världens största partikelaccelerator, LHC (Large Hadron Collider), studerar fyra stora experiment vad som händer när protoner accelereras och kollideras vid de högsta energier som uppnåtts experimentellt. **LHCb-experimentet** fokuserar på precisionsmätningar av partikelfysikens standardmodell.

Standardmodellen är den fysikteori som beskriver elementarpartiklarna – deras egenskaper och hur de växelverkar med varandra. Materien är uppbyggd av flera typer av partiklar, den första är kvarkar med en kategorisering som kallas för aromer (från engelskans *flavours*): upp, ned, sär, charm, botten och topp. Den andra typen är leptoner, där elektronen kanske är den mest bekanta elementarpartikeln. Den växelverkan som finns mellan elementarpartiklar förmedlas av kraftverkanspartiklar, så kallade bosoner. Den starka, elektromagnetiska och svaga kraften förmedlas av gluoner, fotoner, respektive W - och Z -bosoner. Kvarkarna existerar inte som fria partiklar, utan endast i sammansatta objekt, så kallade hadroner. De vanligaste kombinationerna är i trekvarkstillstånd (baryoner), eller som kvark-antikvarkpar (mesoner).

Dessa partiklar och deras växelverkan

undersöks genom att partiklar kollideras vid höga energier för att skapa nya exotiska partiklar, vars sönderfallsprocesser studeras. Detta sker till exempel vid LHC, där protoner kollideras vid fyra kollisionpunkter som är omgivna av stora experiment. Svenska fysiker bedriver forskning vid tre av dessa experiment. Vid ATLAS-experimentet studeras processer vid de allra högsta energierna, till exempel fysik kopplat till Higgsbosonen som upptäcktes 2012, men man söker också efter helt nya fundamentala partiklar. Vid ALICE-experimentet studeras ett tillstånd av materia som fanns i det tidiga universum, så kallat kvarkgluonplasma. Sedan två år bedriver forskare vid Uppsala och Lund universitet också forskning vid LHCb-experimentet. LHCb-experimentet studerar de hadroner som skapas vid kollisionerna och mäter deras sönderfall med hög precision. LHC byggdes för att utforska

de högsta energier som kan återskapas i ett laboratorium, men den ger också unika möjligheter att studera hadronsönderfall. De höga energierna gör att hela spektrat av möjliga hadroner skapas i kollisionerna, vilket inte är fallet vid någon annan accelerator. Den höga intensiteten gör att hadronerna skapas i stora mängder, vilket gör att det även går att mäta mycket ovanliga processer med hög precision. Detta innebär också att den experimentella miljön är utmanande: protonkollisioner sker med 25 ns mellanrum och en stor mängd partiklar skapas vid varje kollision. Därför är LHCb-experimentet konstruerat för att mycket snabbt kunna välja ut de processer som är av intresse och mäta dessa med hög precision.

DETEKTORN ÄR OPTIMERAD för precisionsstudier av hadroner som innehåller charm- (c) eller bottenkvarkar (b). En schematisk bild av detektoruppställningen ►

► visas i figur 1. Experimentet, som är 21 meter långt, 10 meter högt och 13 meter brett, engagerar fler än 1 500 fysiker världen över.

När b - och c -hadroner bildas så har de ofta en låg spridningsvinkel, därför är detektorn instrumenterad i en kon framåt runt strålröret. Eftersom partiklarna som studeras är kortlivade och sönderfaller innan de passerar detektorerna så behöver de återskapas från mätningar av deras sönderfallsprodukter. För att göra det krävs detektorer specialiserade för att kunna mäta både laddade och neutrala partiklar.

Den första detektormodulen är beläget endast 5,5 mm från kollisionspunkten och kallas VELO, vilket står för *vertex locator*. Den är uppbyggd av 41 miljoner pixlar och dess syfte är att lokalisera produktions- och sönderfallspunkter med hög precision. Varje pixel är $55 \times 55 \mu\text{m}$ stor, vilket ger en noggrannhet på $16 \mu\text{m}$ och en effektivitet på nästan 100 %. För att tillförlitligt kunna spåra alla partiklar så är kravspecifikationerna på VELO-detektorn extra höga. Eftersom den dessutom är belägen nära kollisionspunkten och därför hela tiden genomborras av högenergetiska partiklar behöver också detektorn konstant hållas nedkyld, vilket görs med flytande koldioxid. LHCb har förutom VELO andra detektorer som mäter partiklarnas rörelsemängd, energi och partikeltyp, för att skapa en komplett bild av de processer som studeras.

DE FLESTA PARTIKLAR SOM bildas i kollisionerna är inte av intresse för de mätningar som LHCb gör, därför behövs ett första urval i realtid för att bestämma vilka kollisioner som ska sparas för vidare studier.

I många andra partikelfysikexperiment baseras detta urval på information från vissa detektorer och med begränsade algoritmer, medan LHCb läser ut hela detektorn för varje kollision och sedan tar ett beslut baserat på en full rekonstruktion av de observerade sönderfallen. Detta innebär att LHCb behöver läsa ut och filtrera bort en stor mängd data, 40 terabyte per sekund, som sedan bearbetas av en datorfarm.

Flexibiliteten hos LHCb-detektorn gör det möjligt att studera många olika fysikområden, men två huvudinriktningar kan sammanfattas som studier av det spektrum av hadroner som finns i standardmodellen, och precisionstest av standardmodellens giltighet. Båda har gemensamt att de bättre hjälper oss förstå de betingelser som gällde i universums tidiga historia.

Hadroner består av kvarkar som kan kombineras enligt de regler som ges av den starka kraften, vilket ger ett spektrum av partiklar som LHCb utforskar. Fem av de sex kvarkarna kan ingå i hadroner, undantaget är toppkvarken som sönderfaller för snabbt för att hinna hadroniseras. Alla tillåtna kombinationer förväntas finnas, både som grundtillstånd som sönderfaller genom den svaga kraften och som ett spektrum av exciterade tillstånd som sönderfaller genom den starka kraften. Genom att bekräfta att dessa hadroner finns och mäta deras egenskaper testar LHCb de underliggande teorierna som beskriver hur dessa sammansatta partiklar beter sig.

LHCb har hittills upptäckt 64 nya hadroner, vilkas massa och upptäcktsår visas i figur 2. De flesta är exciterade tillstånd av redan kända hadroner, men ett nytt grundtillstånd har upptäckts, Ξ_{cc}^{++} , som be-

står av två charmkvarkar och en uppkvark. Detta är den första baryonen med mer än en b - eller c -kvark som observerats, och den utgör startpunkten för ett nytt forskningsområde om hur dessa hadroner beter sig.

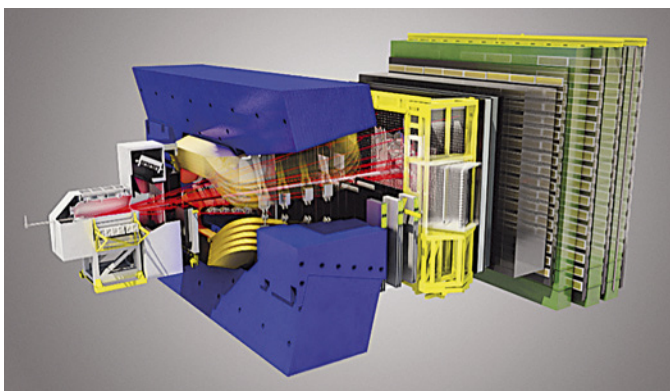
Även exotiska kombinationer av kvarkar har observerats – kombinationer av fyra kvarkar (tetrakvarkar) och den första observationen av hadroner med fem kvarkar (pentakvarkar). Genom att studera dessa nya klasser av partiklar och undersöka deras inre struktur lär vi oss mer om hur den starka kärnkraften binder samman hadroner.

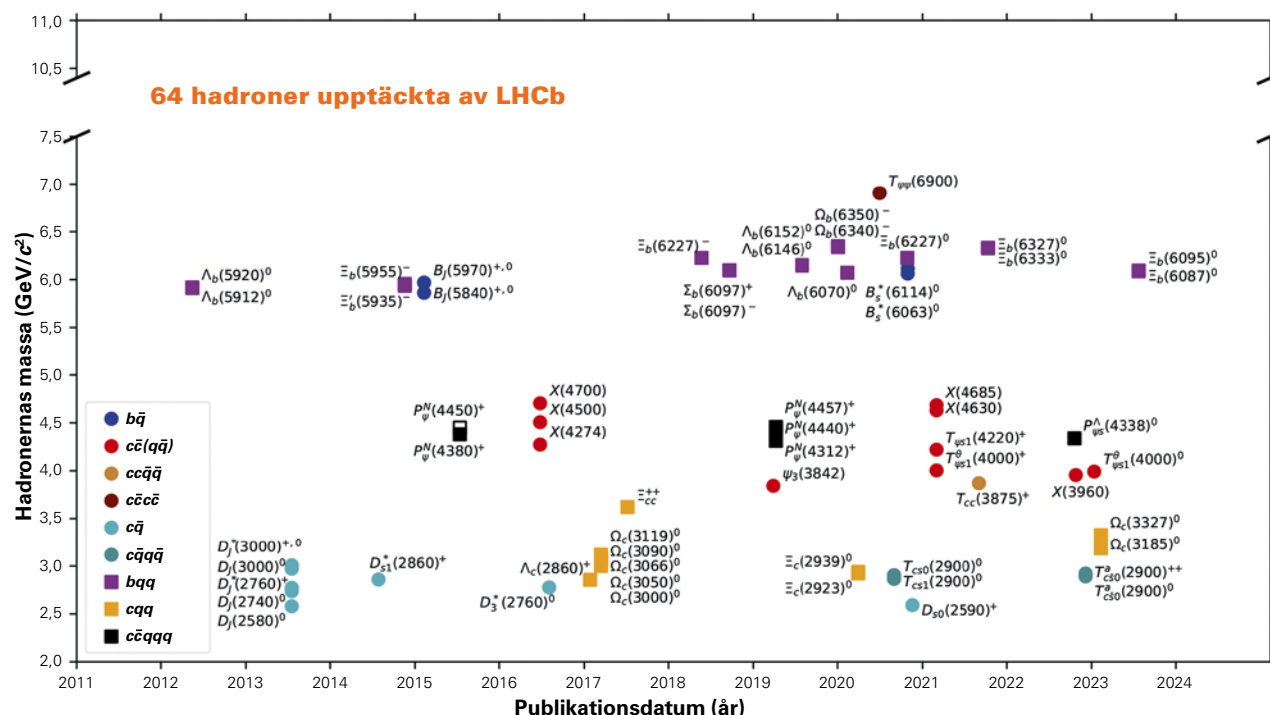
STANDARDMODELLEN HAR stresstestats och förfinats med tusentals mätningar. Än så länge har den visat sig vara en tillförlitlig beskrivning av naturen ned till de minsta avstånden och högsta energierna som vi kan studera. Samtidigt har vi goda skäl att tro att den inte är en komplett beskrivning. Den inkluderar exempelvis inte naturens fjärde kraft (gravitationen), den förklarar inte vad mörk materia är och den ger inte heller någon förklaring till varför vi lever i ett universum dominerat av materia istället för antimateria. Det finns också teoretiska argument för varför standardmodellen inte kan vara en fullständig beskrivning av universum.

Enligt kvantfysiken är det möjligt även för mycket tunga partiklar att bidra till ett sönderfall trots att det formellt bryter mot energiprincipen. Dessa partiklar befinner sig då i ett virtuellt tillstånd. Till exempel är de svaga kraftverkanpartiklarna W och Z mycket tyngre än både b - och c -kvarkarna men utan deras virtuella bidrag skulle inte svaga sönderfall vara möjliga. Om det finns tunga partiklar som inte kan mätas genom direkta kollisioner kan de alltså fortfarande ge indirekta bidrag. LHCb utför många mätningar av sönderfall som fungerar som precisionstest av standardmodellen, för att hitta avvikelser från dess förutsägelser. Desto bättre precision man uppnår, desto högre energier har man också känslighet för.

ETT VIKTIGT forskningsområde för LHCb är att studera skillnaden mellan materia och antimateria. Första indikationen på att antimateria existerar kom i slutet på

FIGUR 1 LHCb-experimentet är beläget 100 meter under marken. Protonstrålarna vid LHC kollideras upp till 40 miljoner gånger per sekund och vid varje kollision kan många oberoende fysikprocesser äga rum.





FIGUR 2
De hadroner som har upptäckts på LHCb, kategoriserade efter massa och upptäcktsår.

1920-talet då fysikern Paul Dirac formulerade ekvationerna för elektronens beteende vid relativistiska hastigheter. Han insåg att ekvationerna innebar att elektronen har ett antimateriasyskon med samma massa men motsatt elektrisk laddning. Denna partikel, positronen, upptäcktes kort därefter.

Idag vet vi att alla kvarkar och leptoner har en motsvarande antimateriapartner. Vad vi däremot ännu inte förstår är varför vårt synliga universum nästan uteslutande består av materia. En rimlig förklaring är att det finns en mekanism som favoriserade materia i det tidiga universum. I standardmodellen ingår två mekanismer som gör skillnad på materia och antimateria, en för kvarkar och en för neutriner. LHCb-experimentet studerar mekanismer för kvarkar.

Ekvationerna för svaga sönderfallsprocesser ser något annorlunda ut om man byter ut en partikel mot dess antipartikel och samtidigt speglar dess koordinatsystem, eftersom vissa termer kan byta tecken. Detta brott av den kombinerade laddnings- och paritetssymmetrin, eller CP-symmetrin som den kallas, är en subtil effekt där både mätningar och beräkningar med hög precision är nödvändiga för att studera den. Men det CP-symmetribrott

som förutsägs av standardmodellen är inte tillräckligt stort för att kunna förklara obalansen mellan materia och antimateria vi observerar i universum. Detta är en stark indikation på att det därför finns fysik bortom standardmodellen.

LHCb har gjort flera världsledande mätningar av CP-symmetri och LHCb upptäckte att denna symmetri är bruten även i sönderfall av charmade partikelsystem. Upptäckten gjordes i studier av charmmesonon D^0 som består av en charm och anti-uppkvark. Vad som gör just charmsönderfall speciellt är att det förväntade symmetribrottet från standardmodellen är exceptionellt litet. Om man skulle lyckas mäta ett symmetribrott som avviker från motsvarande teoretiska beräkningar vore det därför en indirekt upptäckt av fysik bortom standardmodellen. Den nuvarande mätningen av CP-asymmetrin mellan D^0 och $\bar{D}^0$ kan vara förenlig med standardmodellens förutsägelser, men det krävs flera kompletterande mätningar från andra typer av charmsönderfall för att ett tydligt mönster ska kunna träda fram.

FÖR ATT GÖRA DESSA precisionsmätningar behövs en unik detektor som är utvecklad för just det syftet. Utveckling av så-

dana detektorer är ett forskningsområde i sig, där de underliggande teknologierna utvecklas och sedan byggs ihop till stora experiment. LHCb har varit banbrytande också på detta område, där den första versionen av experimentet genomförde mätningar mellan 2010 och 2018. Experimentet har sedan uppgrederats, där många innovativa teknologiska lösningar har använts, och mätningarna återupptogs 2022.

Det finns planer på ytterligare en uppgradering som beräknas kunna äga rum om cirka tio år, för att ytterligare förbättra precisionen i mätningarna. Ett utmanande utvecklingsprogram behövs för att bygga de detektorer som krävs för den andra uppgraderingen av LHCb-experiment. Detta gör att LHCb har ett spännande forskningsprogram inom både partikelfysik och detektorutveckling som sträcker sig in på 2040-talet. Och som Karin Boye så insiktsfullt uttryckt det: "nog finns det mål och mening i vår färd – men det är vägen, som är mödan värd."

LARS EKLUND

Professor, Institutionen för fysik och astronomi, Uppsala universitet

PATRIK ADLARSON

Forskare, Institutionen för fysik och astronomi, Uppsala universitet

En fysiker faller för *Avgrunden*

Avgrunden

Svensk katastroffilm,
premiär 15 september 2023

Regissör: Richard Holm

Manus: Richard Holm,
Robin Sherlock Holm och
Nicola Sinclair

Skådespelare: Tuva
Novotny, Peter Franzén, Kardo Razzazi m.fl.



■ Jag har en blandad känsla inför katastroffilmer. Om jag redan ser i trailers att de är för överdrivna eller våldsamma tycker jag att det är slöseri med tid att titta på dem. Som rymdlärare och -forskare har jag dock känt mig förpliktad att följa vilken typ av tolkningar mina studenter utsätts för av populära rymdkatastroffilmer. Jag har i årtal undervisat om rymdmiljöns verkan på farkoster och astronauter i rymden. Väl inne i biosalongen pågår en undermedveten analys i mitt huvud om det som beskrivs ens kan ske på riktigt. Att hjälten överlever när hen dimper ner från rymden på jorden bara lite omtumlad, eller åker på och avstyr en asteroid från att krocka med jorden är mot fysikens men inte mot katastroffilmernas lagar.

Jag var därför lite orolig inför att se hur pinsamt gruvkatastrofen i Kiruna skulle beskrivas. Det är ju ändå fråga om min hemstad under halva mitt liv och miljön där mina barn har vuxit upp. Så jag hade utöver fysikanalysen även det känslomässiga att bearbeta med bekanta gator jag traskat på redan som ung och hus jag bott i.

Det sprängs varje natt i Kirunagruvan och det känns över hela stan. Om man inte lyckats somna innan, så då vet man att nu

är klockan halv två. Oftast är ljudet och skakningarna dova, men ibland smäller det hårt. Det hände en gång under mina tidiga år i Kiruna då jag bodde granne med gruvan. Den natten förolyckades tre personer, inte i ras men i gasförgiftning. Så olyckor händer även om de med dödlig utgång har minskat under gruvans över ett hundraåriga historia.

HÄNDELSERNA I FILMEN *Avgrunden* inträffar året 2020. Filmen beskriver ett familjedrama inflett i ett ras i gruvan som sprider sig under staden. Ungdomarna i filmen känns autentiska, festar under midnattssolen i närheten av rasriskområdet och bryter sig genom avspärrningarna. Vissa är lite vilsna och andra mycket principfasta. De älskar sin stad, kämpar för att rädda ett kärt fik då andra bara vill dra så långt bort som möjligt. Vuxna i filmen visar hängiven yrkesskicklighet samtidigt som de strular till i sina privata relationer. Med duktiga skådespelare har man lyckats fånga in Kirunajargongen och -atmosfären på ett härligt vis, bevittnar även lokalbefolkningen. En stigande spänning byggs upp, gator slukas i underjorden, människor och bilar likväl. Slutet på dramat utspelas i den numera övergivna Hjalmar Lundbohmsskolan, där de flesta Kirunaungdomarna har fått sin utbildning.

Att gamla Kiruna kommer att rasa ner i ihålligheter som uppstår efter malm-brytningen är en verklig risk som påbörjade processen att flytta staden. Kan då en överraskande storskalig katastrof

verkligen kunna hända före man blir klar? Jag frågade några Kirunabor. Skakningar och sättningar från gruvan kan numera kännas flera gånger i veckan. Ovan jord är man inte rädd, men orolig för de som jobbar inne i gruvan. Säkerhetsarbetet är rigoröst, men den mänskliga faktorn kan alltid bidra till olyckor. Nyligen förolyckades en ung kvinna som blev överkörd av en truck på gården.

DEN VÄRLDSUNIKA stadsomvandlingen fortsätter i högt tempo. Det var säkert mycket lockande att göra en film med katastrofinriktning om orsaken. Min fysikeranalys är ändå rätt så förlåtande. Visst kan ras ske om man slarvar på hög nivå med planeringen av flytten i tid. Några Kirunabor som kommer att evakueras inom 5–10 år tror dock att deras flyttlass kommer att köra lugnt till ett nytt anvisat hem.

I filmens slutscener, i det som var kvar av Hjampis datasal, förekom nog lite överdrivna akrobatiska övningar. Den Hollywoodaktiga slutlösningen av familjedramat där nästan allt föll vackert på plats sänkte lite filmens trovärdighet för en torr fysiker, men alltför pinsamt blev det inte. Jag fick lite samma stolta känsla som när jag en gång, i en annan tid, följde mina egna barns uppträdanden på samma stads försvunna scener.

ASTA PELLINEN-WANNBERG

Professor emerita i fysik,
Umeå universitet, och Institutet för
rymdfysik (Kiruna 1982–2015)

Bergen Kiirunavaara (i förgrunden) och Luossavaara på var sin sida om dagens Kiruna. Stadskärnan ska flyttas ca 3 km österut, eftersom Kiirunavaara-gruvan underminerar staden.

Svårt att hänga med i fotonernas dans?

Fotonernas dans

Anton Zeilinger

Översättare: Tom Sköld

Förlag: Fri tanke

Antal sidor: 365

Utgiven: oktober 2023

ISBN: 978-91-89-73374-9



■ Kvantfysikens närmast ikoniska status som djupsinnig men för mänsklig intuition principiellt obegriplig vetenskap framstår ännu efter ett drygt sekel som ohotad, inte bara för lekmän utan minst lika mycket för fysiker och filosofer av facket. "De som inte är chockade när de först kommer i kontakt med kvantteorin kan inte ha förstått den" lär till exempel Niels Bohr ha sagt till Werner Heisenberg.

Den kanske mest välkända skillnaden mellan kvantfysiken och den klassiska fysiken är dess indeterministiska karaktär: Även om "tillståndet" för ett fysikaliskt system är känt så väl det går så kan man i allmänhet ändå bara ge en sannolikhetsfördelning för de tänkbara utfallen av en mätprocess. En annan viktig aspekt är observatörens mer aktiva roll i kvantfysiken. En mätning av en storhet innebär samtidigt alltid en påverkan på systemets framtida tillstånd. Mätningar av olika storheter är inte heller alltid kompatibla med varandra.

DE HÄR SVÄRIGHETERNA är vid det här laget väl kända (men fortfarande lika förbryllande). De är relevanta redan för att förstå en enda partikel, till exempel en enskilda foton eller den enda elektronen i en väteatom. Men ännu märkligare framstår kvantfysiken när den handlar om system som består av flera delar. Ett sådant system kan befinna sig i ett väldefinierat tillstånd, men detta kan vara "sammanflätat", vilket betyder att de ingående enskilda delarna var för sig inte befinner sig i några tillstånd alls. Även om de olika delarna befinner sig på långt avstånd från varandra så blir resultaten av ungefär samtida mätningar på dem då subtilt korrelerade med varandra.

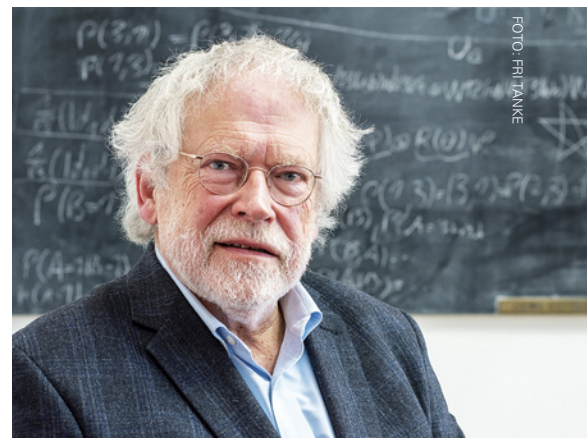
John Bell härledde 1964 ett nödvändigt villkor ("Bells olikhet") för korrelationer mellan mätningar på de

olika delarna av ett sammansatt system under vissa "klassiska" antaganden som tillåter dolda variabler, men inte någon spöklik verkan på avstånd. Det är dock lätt att visa att kvantfysikens förutsägelser inte alltid uppfyller detta villkor. Sammanflätning är en omedelbar konsekvens av kvantfysikens grundläggande postulat och uppstår så fort vi betraktar mer än en partikel. Bells analys går att undersöka empiriskt, och sådana experiment har utfallit till kvantfysikens fördel.

Sammanflätning är av växande betydelse inom den kvantinformationsteknologi som nu håller på att växa fram. Stora ansträngningar görs på flera håll för att bygga en kvantdator (läs mer på s 26). Kvantkryptering och även så kallad kvantteleportering, där ett systems tillstånd överförs till ett annat avlägset system, är ytterligare exempel på tillämpningar. Här är Anton Zeilinger en av pionjärerna, och han tilldelades (tillsammans med John Clauser och Alain Aspect) Nobelpriset i fysik 2022 (läs mer i [Fysikaktuellt nr 4/2022](#)).

OM DESSA FRÅGOR HAR Anton Zeilinger skrivit en populärvetenskaplig bok (på tyska 2005 och på engelska 2010), som nu föreligger på svenska med titeln "Fotonernas dans" i översättning av Tom Sköld.

Zeilinger är verksam vid universitetet i Wien, och boken börjar med en prolog som beskriver de teleporteringsexperiment som han utförde mellan två mätstationer på olika sidor av Donau. Därefter följer 38 korta kapitel innan boken (med totalt 365 sidor) avslutas med ett appendix, ett efterord och en kort ordlista. I bokens första halva får vi följa de fiktiva förstaårsstudenterna i fysik Alice och Bob, som tar mod till sig och söker upp sin föreläsare professor Kvantinger för att få veta mer om kvantfysik. Han erbjuder dem att få genomföra experiment under handledning av doktoranden John för att själva undersöka sammanflätningens fenomen. Ungefär mitt i boken gör Alice och Bob en utflykt till Alpbach (där de tittar på Erwin



Anton Zeilinger.

Schrödingers grav) tillsammans med förstaårsstudenten i filosofi Charlie, som får spela den nyktrare skeptikers roll. Sedan försvinner Alice, Bob och Kvantinger ur boken för att bara återvända som hastigast i efterordet. De avslutande kapitlen spekulerar om kvantinformationsteknologins framtid, och ger även en kortfattad diskussion om kvantfysikens filosofiska betydelse. Appendix utgörs av en populärvetenskaplig essä om sammanflätning för den breda allmänheten av professor Kvantinger.

Skönlitterär gestaltning är knappast Zeilingers starkaste sida. Den inledande och avslutande miljöbeskrivningarna tillför inte texten något, och de fiktiva personligheterna i ramberättelsen är påfallande platta. Om Alice får vi genast veta att hon "snurrar nervöst på en lock i sitt blonda hår", och liknande beskrivningar av hennes frisyrbestyr återkommer på flera ställen. Om Bob, John, Charlie eller professor Kvantinger har några motsvarande tics framgår dock inte.

POPULÄRVETENSKAPLIGA TEXTER om kvantfysikens grunder tenderar att ha en teoretisk slagsida, men Zeilinger vinnlägger sig om ett experimentellt perspektiv. Matematiska ekvationer spelar följaktligen en uppfriskande minimal roll, och betoningen ligger i stället på Alice och Bobs konkreta arbete med inställningar och avläsningar av experimentutrustningen ►

RECENSIONER

► och konsekvenserna av rent statistiska fel och ofullständig detektering. Samtidigt är resonemanget naturligtvis hela tiden mycket förenklat, och någon realistisk inblick i Zeilingers verkliga experimentella arbete får man knappast. Det är synd, för sådana böcker finns det för få av, och Zeilinger skulle säkert kunna berätta mycket intressant om detta.

DET FINNS EN DEL populärvetenskapliga böcker som lyckas med miraklet att ge något, om inte till alla, så i alla fall till en häpnadsväckande bred läsekrets från genuina lekmän till forskare som faktiskt själva är verksamma inom området. Ett rimligare krav är väl att alla texter skall ha i alla fall någon målgrupp som kommer att berikas av läsningen. Enligt baksidestexten är Zeilingers bok tänkt som en pedagogisk introduktion till kvantfysikens värld, men här är jag tveksam till hur den skulle fungera. Den som har läst en (eller ännu hellre två) kurser i kvantfysik på högskolenivå kommer att känna igen mycket och kunna

"Det är i alla fall glädjande att kvantfysiken, lika obegriplig som någonsin, [...] fortfarande har ungdomlig kraft kvar."

förstå de ganska skissartade beskrivningarna av olika fenomen. Har man ingen erfarenhet av Bells teorem och teleportering så kan man även få en första inblick i området, men utöver det är frågan hur mycket nytt en sådan läsare egentligen skulle lära sig. För någon som verkligen är novis på kvantfysikens område misstänker jag att boken skulle framstå som en lätt obegriplig redogörelse för något slags konstiga fenomen, men inte väcka någon verklig entusiasm. Jag tror till exempel inte att jag

skulle vilja rekommendera den som litteratur inför ett projektarbete på gymnasie- eller kandidatnivå med tanke på hur förvirrat resultatet lätt skulle kunna bli.

Kanske är problemet att Zeilinger, trots bokens inte obetydliga omfång, hela tiden verkar lite stressad och inte riktigt har tålamod att förbereda, genomföra och analysera sina olika resonemang fullt ut. Boken ger helt enkelt ett lite slarvigt intryck. Man saknar också lite fler referenser och förslag till vidare läsning.

DET ÄR I ALLA FALL glädjande att kvantfysiken, lika obegriplig som någonsin, efter ett mer än hundraårigt vitalt liv fortfarande har ungdomlig kraft kvar för dessa spännande nya utvecklingslinjer. Och utmaningen att föra ut dess många olika aspekter till olika målgrupper, från nybörjare till experter, kvarstår för den som vågar anta den!

MÄNS HENNINGSON
Göteborgs universitet

FORSKARUTBILDAD? Vi ger dig möjligheter till fortsatt utveckling!

På FOI får du som är doktor eller licentiat chans att kombinera teoretiska studier med tillämpad problemlösning för Sveriges säkerhet.

Du kan vara den vi söker,
välkommen på informationsträff!

Läs mer på
foi.se/forskarutbildade



FOI

Totalförsvarets
forskningsinstitut



Vetenskap och teknologi hand i hand

Batteriforskning, och batteriframsteg i allmänhet, har fått en framträdande plats i mångas medvetande de senaste åren. I forskarsamhället kom det breda vetenskapliga erkännandet kanske först i och med Nobelpriset i kemi 2019, medan gemene man nog även innan dess insett **batteriteknologins** möjligheter i bland annat mobiltelefoner och elbilar.

Batteriteknologin har tagit gigantiska steg och förändrat vårt samhälle i grunden de senaste 10–15 åren. Men hur ser dagens vetenskapliga frågeställningar ut, och hur har de påverkats av teknologins framfart? Svaren är, som oftast, inte entydiga och enkla. Jag har varit med på resan de senaste 30 åren, och tänkte här ge min bild av hur vetenskap och teknologi konkret kan ha positiva synergieffekter, och var vi är idag inom batteriforskningen.

Det som framförallt är tydligt är att

den främsta forskningen inom batteriområdet idag är *applikationsinspirerad*. Nej, detta är inte detsamma som tillämpad forskning, utan det handlar om forskning som är just *inspirerad* av teknologin och applikationsmöjligheterna. Vad betyder detta konkret? Jo, att siktet är inställt på en reell målbild. Vi forskar för att lösa ett problem som verkligen finns, men gärna med nya material och lösningar. Dessutom försöker forskare som arbetar applikationsinspirerat verkligen förstå de praktiska aspekterna av

teknologin, även bortom sin egen expertis. Till sin hjälp har de ett antal ”roadmaps”, framtagna av akademi och industri gemensamt.

ETT BRA EXEMPEL, SOM även är ett arbete lett från Sverige, är Battery2030+’s roadmap (battery2030.eu), som ger en målbild, med ett flertal parametrar eller indikatorer listade.

Som forskare kan man använda dessa parametrar för att utveckla nya idéer och frågeställningar, med hjälp av relevanta ►

► och till viss del standardiserade protokoll.

Det som jag vill betona är att det aldrig känts som om att detta arbetssätt begränsat min forskningsfrihet – tvärtom – det hjälper mig snarare att *tänka rätt*, på det sätt som Thomas Thorild menade när han myntade Uppsala universitets devis ”Tänka fritt är stort men tänka rätt är större”. Framförallt är forskningens målbild ganska bred och tillåtande. Det är stor skillnad på målbilderna om man jobbar med det som ligger närmare i tid till ”produktifiering” – så kallade *leveranser* förväntas på något sätt – jämfört med om man jobbar med något som är mer konceptuellt – där nästan alla inom fältet blir förvånade över varje framsteg man gör. En annan anledning till att forskningen känns påtagligt fri är att exakt *hur* man kommer framåt inte alls styrs – att vara agnostisk till koncept och angreppsvinklar premieras verkligen.

SÅ LÅNGT MEST OM hur teknologin återkopplar till forskningen – men det allra bästa är när återkopplingscirkeln sluts. Ett exempel på detta är olika operando-studier. *Operando* betyder att man studerar något under det att det utför sin praktiska funktion. För till exempel ett uppladdningsbart batteri blir detta un-

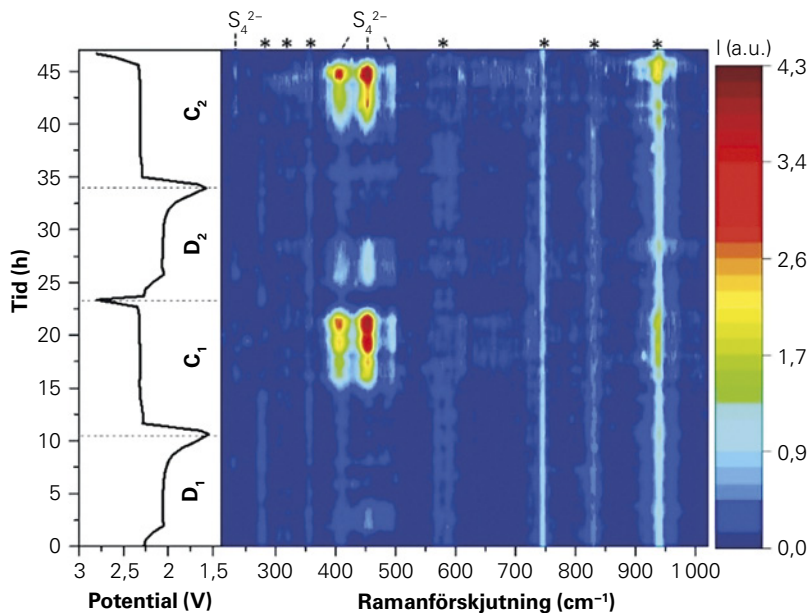
der ur- och uppladdning. Idag utförs en stor mängd operando-studier på batterier, såväl på universitetens egna lab som vid stora anläggningar som MAX IV eller ESRF (European Synchrotron Radiation Facility), och snart också på ESS. Typiskt för dessa experiment är att de fokuserar på att studera en mekanism av betydelse för laddningscykeln, gärna nere på molekylär nivå, för att i ett senare skede kunna använda den nya förståelsen för att förbättra batteriet rent ingenjörsmässigt.

Ett typexempel på en operando-studie är ett litium-svavelbatteri där man studerar elektrolyten som funktion av batteriets laddningstillstånd. Litium-svavelbatterier är en lovande framtida batteriteknologi, men ett efterhängset problem är att svavlet från den positiva elektroden gärna löser sig som olika polysulfider i elektrolyten, vilket reducerar batteriets kapacitet och livslängd. Med hjälp av speciella battericeller anpassade för konfokal Ramanspektroskopi¹ kan man optiskt följa elektrolytens sammansättning under ur- och uppladdning. I diagrammet nedan syns detta som ett färgdiagram för olika Ramanband som påvisar olika polysulfider, där D och C står för urladdning (*Discharge*) respektive uppladdning (*Charge*). Och när vi väl vet vilka polysulfider som skapas, och helst även varför,

kan vi jobba både med nya elektrolytkoncept och elektrodkonstruktioner för att motverka lösligheten och därmed förbättra litium-svavelbatteriernas långsiktiga prestanda.

Inom detta forskningsfokus ryms såklart även en hel del metodutveckling för att öka relevansen, som till exempel kan vara utveckling av nya experimentceller. Dessa ska såklart vara optimerade för de fenomen och mekanismer man vill undersöka, men samtidigt vara relevanta för en batteriapplikation – det vill säga på något sätt vara ”realistiska”. Trots kravet på realism finns det plats för mer eller mindre helt konceptuella studier, bara man är tydlig med att man gör stora avsteg från realismen. Vetenskapen ger på så sätt tydliga bidrag till framtida teknologi, och den största relevansen fås när tillräcklig hänsyn tagits till verkligheten. På så sätt kopplar teknologin tillbaka och cirkeln sluts.

EN ANNAN BATTERITEKNOLOGI, mycket mera lik dagens litiumjonbatterier men som undviker en hel del materialresursproblematik och erbjuder bättre effektprestanda, är natriumjonbatterier. Inom H2020-projektet NAIADES (NA-Ion bAttery Demonstration for Electric Storage, cordis.europa.eu/project/id/646433) utförde vi experiment som på många sätt kan klassificeras som ”1800-tals forskning” – vi mätte helt enkelt grundläggande fysikaliska egenskaper (konduktivitet, densitet, viskositet med mera) för ett antal olika elektrolyter designade för natriumjonbatterier. Detta främst för att kunna optimera cellprestanda, men även för att utvärdera eventuella fördelar ur ett uthållighetsperspektiv. Forskningen låter kanske inte så fascinerande i sig, men den var otroligt nyttig. Numer utför vi



Färgdiagram för olika Ramanband som påvisar olika polysulfider (som t ex S_4^{2-}). D och C står för urladdning (*Discharge*) respektive uppladdning (*Charge*).

¹ Ramanspektroskopi är en icke-destruktiv teknik, belönad med Nobelpris i fysik 1930, som typiskt används för att analysera kemiska strukturer och system.

Konfokalmikroskopi innebär att ljus som inte härrör från fokalplanet filtreras bort från att detekteras, vilket innebär att man selektivt kan studera fenomen på olika djup inuti (transparenta) material.

Batteriforskare bygger ofta ihop egna knappcells-batterier för att kunna studera olika materials egenskaper i praktiken.

FOTO: VARTA GRAPHENE FLAGSHIP



samma arbete betydligt mera automatiserat inom Battery2030+-projektet BIG-MAP (www.big-map.eu, Chalmers, UU och Northvolt är svenska partners i projektet) genom att koppla ihop simuleringar av material med robotiserade experiment med AI-assisterad utvärdering. Idag är natriumjonbatterier relativt stort i Europa även som batteriteknologi. TIAMAT i Frankrike (www.tiamat-energy.com), som delvis bygger på NAIADES, och Altris i Sverige (www.altris.se), ligger väl till och de har såklart haft stor nytta av den skapade kunskapsbasen.

EN LITE ANNAN VINKEL på kopplingen mellan vetenskap och teknologi, och hur den senare betalar tillbaka för de framsteg som den ändå bygger på, är att våra utbildade doktorer och postdoktorer ofta ses som våra främsta resultat – de är så oerhört behöva ute i batteriindustriens R&D-enheter. Detta gäller både för våra svenska batteriforskningsmiljöer, och världen över. Det kunde vara nedslående att våra vetenskapliga insikter och publikationer ses som mindre intressanta, speciellt när vi ser på vårt internationella genomslag att vi faktiskt har excellens, men en positiv tolkning är att vi levererar både en konkret ”produkt” som behövs i stor

mängd just här och nu, och att den träning våra doktorer får i sin forskarutbildning och forskarmiljön verkligen är relevant. De verkliga vetenskapliga framstegen är, som ju är vanligt inom många någorlunda mogna vetenskapsfält, betydligt svårare att identifiera.

Detta är, som jag ser det, de största skillnaderna mot situationen för 30 år sen. Vi som utexaminerades då visste inte vart vi var på väg, och det fanns mer eller mindre inga aktörer som var speciellt intresserade av vad man lärt sig inom batteriforskning. Det vetenskapliga samhället hade också på den tiden ett ganska uttalat ointresse av forskning som vägledades av och siktade på att bidra till något så tillämpligt och teknologiskt som batterier. Idag har vi iallafall internationellt något slags erkännande.

HUR SER DÅ FRAMTIDEN UT? Vi har en stark diversifiering av teknologier baserade på grundforskning och applikationsinspirerad forskning – nu kommer till exempel natriumjonbatterierna ovan verkligen ut på marknaden. Ett ännu bredare batteriforskarssamhälle är på gång – och forskning behövs kring fler delar av värdekedjan². Samtidigt krävs redan idag en hel del av den som vill jobba med verkligt framåtsiktande forskning. Det är lätt

att lockas av de snabba pengar som finns inom dagens batteriteknologi och batteriindustri – men vi måste också bygga ut hålligt för framtidens batteriforskning på universiteten. Detta kräver både breda insatser såväl som mer riktade satsningar på excellens – men jag är övertygad om att vetenskap och teknologi hand i hand, att vara applikationsinspirerad, är en nyckel till framgång även i framtiden.

PATRIK JOHANSSON

Professor, Materialfysik, Chalmers tekniska högskola och Vetenskapsråds-professor
”Next Generation Batteries”

² Med *värdekedja* avses här alla de olika steg och delar – från framställning av råvaror och material för produktion till återanvändning och återvinning efter avslutad livslängd i en given applikation – som behöver vara på plats för bästa nyttjande av våra resurser.

Läs mer

”Monitoring polysulfide solubility and diffusion in fluorinated ether based electrolytes by operando Raman spectroscopy”, R. Bouchal, A. Bouloued and P. Johansson, *Batteries and Supercaps*, 2020, 3, 397-401

”Non-Aqueous Electrolytes for Sodium-Ion Batteries”, A. Ponrouch, D. Monti, A. Bosch, B. Steen, P. Johansson and M. R. Palacin, *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3, 22-42

Brownsk rörelse och italienska fastlagsbullar

Det är bekvämt med fysik! Med några få fundamentala begrepp skapar vi en bred förståelse för till synes olika fenomen. Brownsk rörelse, eller **slumpvandring**, gav Einstein möjlighet att beräkna vattenmolekylernas storlek, men den används också till att beskriva både värmeledning och diffusion.

En foton vandring från solens centrum eller genom nyslagen grädde kan beskrivas med slumpvandring. Hur mycket längre tid tar det för fotonen att röra sig om den hela tiden krockar med partiklar jämfört med om den rör sig obehindrat?

Slumpvandring återkommer på flera ställen i fysiken och ganska ofta i köket; det är både centralt och svårt att få en känsla för. Det är enkelt att intuitivt förstå hur lång tid det tar för en partikel med en viss fart att röra sig avståndet mellan punkten A och punkten B, men hur lång tid tar det om partikeln hela tiden kolliderar med andra partiklar och vid varje kollision slumpvis ändrar riktning? Vid varje kollision glömmar partikeln dessutom var den har varit och vart den var på väg. I ett av sina berömda arbeten *annus mirabilis* 1905 förklarar Einstein hur man kan beskriva rörelsen hos ett pollenkorn på en vattenyta om man antar att det utsätts för upprepade kollisioner med små partiklar – vattenmolekylerna. Botanisten Robert Brown hade 1827 beskrivit fenomenet efter att ha studerat ett litet pollenkorn från släktet *Clarkia pulcella*.

En annan form av

slumpvandring är att långsamt strosa runt planlöst på Roms gator och torg en tidig vårdag utan vare sig karta eller mål. Helt ofelbart kommer man snart att trilla över en trevlig liten pasticceria med gott kaffe och om man har lite tur serverar de kanske traktens specialitet – *Maritozzi con la panna* – Italiens svar på vår svenska fastlagsbulle. Nu för tiden är det kanske vanligare med en italiensk variant av croissant (*cornetti*) till frukost, men traditionellt serverades det ofta en söt bulle fylld med nyslagen grädde bredvid frukostkaffet. Namnet Maritozzi kommer sig av traditionen att unga fästmän skulle servera dem till sina fästmör, gärna med en ring gömd i.

NU NÄR FASTLAGSBULLAR serveras i alla möjliga former här i Sverige är det kanske dags att prova en traditionell italiensk bakelse där bullen doftar förföriskt av apelsinzeest och den vispade grädden hålls strikt mellan de två bullhalvorna så att det nästan formas en liten Pacman-gubbe. Precis när du ska ta ett bett i din bulle ser du hur vit grädden är och kommer att tänka på hur ljuset sprids – men för att få fin ljusspridning behöver vi först lite nyvispad grädde, innan vi fortsätter med fotonernas slumpartade vandring.

En perfekt vispad grädde till en Maritozzi är luftig, lagom fast, och sprider ljuset fint så att färgen blir vit, vilket kräver omsorgsfull vispning. Först behövs en fet grädde, minst 30 % fetthalt, men helst 35–45 %. När luft vispas in i grädden kommer fria lipider från fettkulornas

Socker i grädden

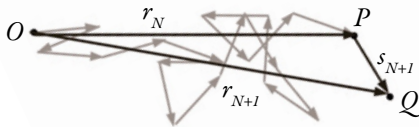
Hur är det egentligen med rådet att tillsätta socker? Nja, det är ingen nödvändighet. Grädden kan bli lite stabilare eftersom den får något högre viskositet, framför allt om sockret tillsätts efter hand. Det gäller dock främst florsocker – strösocker kan tvärtom göra grädden mer svårvispad. I slutändan är det snarast en smaksak.

membran att rivas av och stabilisera gränssytan mellan luft och vätska. Fettkulor anrikas i den tunna vätskefasen mellan luftbubblorna och bidrar ytterligare till stabiliteten. För att detta ska ske krävs tillräcklig kraft, samtidigt som alltför snabb och intensiv bearbetning leder till oönskat resultat. Om för mycket av membranet rivs av och temperaturen dessutom ökar aggregerar fettkulorna väsentligt – vilket är grunden till omvandlingen till smör. För den som har tid kan det därför vara väl värt att vispa grädden för hand och se till att såväl grädde som bunke är väl kylda först.

Den perfekt vispade grädden är len i konsistensen, stannar en stund i munnen utan motstånd och utan att kännas "oljigt fet". Vi kan vara tacksamma för att Gustav de Laval uppfann separatorn 1877, innan dess var det omständligt att få upp fetthalten tillräckligt och det kunde ta över en timme att vispa grädden.

TILLBAKA TILL VÄRSOLEN i Rom och vår foton, som rest lite mer än åtta minuter från solens yta för att nå fram till grädden





FIGUR 1
Slumpvandring.

i vår bakelse. Fotonen kommer nu att spridas flera gånger, och hur lång tid det tar för den att röra sig genom grädden är ett kul räkneexempel. Samma beräkning går sedan att överföra till exempelvis en foton som ska ta sig från solens centrum till ytan.

Antag att vår foton börjar sin slumpvandring i punkten O (figur 1). Den knuffas runt och vilken riktning den rör sig i efter varje knuff är helt slumpmässig, men vi antar här att vår foton i genomsnitt rör sig lika långt mellan två på varandra följande knuffar. Efter N knuffar kommer fotonen till punkten P och har förflyttats r_N . Ytterligare en knuff flyttar fotonen till punkten Q och förflyttningen från P till Q beskriver vi med vektorn s_{N+1} .

Hur långt är det nu från utgångspunkten till Q ?

$$r_{N+1}^2 = (r_N + s_{N+1})^2 = r_N^2 + 2r_N s_{N+1} + s_{N+1}^2$$

Eftersom varje knuff ändrar partikelns riktning helt slumpmässigt är medelvärdet lika med noll

$$\langle r_N s_{N+1} \rangle = 0$$

Och eftersom vi antagit att varje knuff i genomsnitt förflyttar vår partikel lika långt har vi att

$$\langle s_{N+1}^2 \rangle = s^2$$

Vi får alltså att

$$\langle r_{N+1}^2 \rangle = \langle r_N^2 \rangle + s^2$$



FOTO: JOHAN MAURITSSON

Medelvärdet på kvadraten av avståndet ökar alltså med s^2 för varje ny knuff så att

$$\langle r_N^2 \rangle = N s^2$$

Efter N knuffar har vår partikel alltså bara förflyttat sig avståndet

$$r_N = \sqrt{\langle r_N^2 \rangle} = \sqrt{N} \cdot s$$

För stora N blir denna sträcka enormt mycket kortare än den sammanlagda sträckan som partikeln har rört sig. Om vi antar att en foton förflyttar sig 1 cm mellan kollisioner inuti solen så tar det flera tusen år för den att nå ytan från centrum, medan det bara skulle ta någon sekund om den rörde sig raka vägen.

I vår härliga vispgräddade är sträckorna lite kortare, men även här tar det mycket längre tid för en foton att passera och den glömmer lätt var den kom ifrån, precis som den nöjda vandraren på Roms gator i vårsolen efter en kaffe och en Maritozzi.

JOHAN MAURITSSON OCH MALIN SJÖÖ
Lunds universitet

En lång och krokig väg solens från centrum till dess yta

Hur många kollisioner kommer en foton att uppleva på sin väg genom solen och hur lång tid tar det?

Solen har en radie på ungefär 700 000 km så om fotonen inte kolliderar tar det 2,3 sekunder, det är den tiden en neutrino tar på sig eftersom den växelverkar så svagt med andra partiklar. Men om fotonen istället bara rör sig 1 centimeter mellan kollisionerna så får vi att det behövs

$$N = \frac{r_N^2}{s^2} = 4,9 \cdot 10^{21}$$

kollisioner och tiden det skulle ta blir

$$t = \frac{N \cdot s}{c} = \frac{r_N^2 \cdot s}{s^2 \cdot c} = 1,6 \cdot 10^{11}$$

sekunder, det vill säga flera tusen år. I själva verket är tiden antagligen ännu mycket längre eftersom densiteten i solen inte är konstant och när fotonen väl kommer ut kommer det inte heller att vara samma foton som skapades i centrum, men det fungerar bra som räkneexempel i alla fall.

Maritozzi con la panna

■ Om du läser den här tidningen när den kom ut så passar det bra att börja baka några egna Maritozzi con la panna, eftersom det är tradition att äta dem på den första fredagen i mars. Här kommer ett väl beprövat recept:

Ingredienser

Tangzhong

(läs mer i *Fysikaktuellt* nr 1/2022)

120 ml vatten

40 gram vetemjöl

Deg

160 ml mjölk

50 g socker

25 g jäst

490 g vetemjöl

60 ml olja (kan bytas mot smör)

60 ml honung

1 tsk vaniljextrakt

Zest från en apelsin

½ tsk salt

1 äggula och lite mjölk att pensla med

Gräddetillfyllningochflorsockeratttoppa med

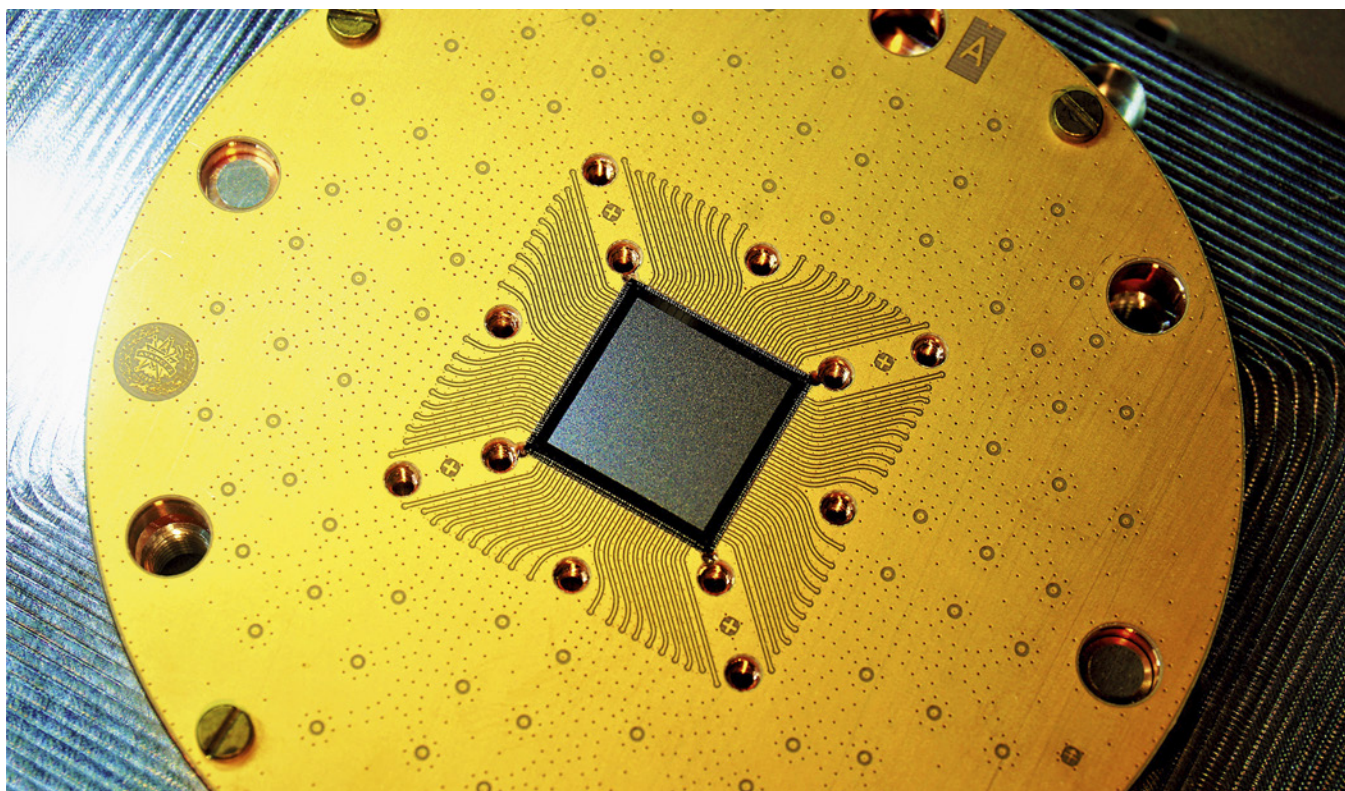
Gör så här

Värm vatten och mjöl till tangzhong under omrörning i 1–2 minuter och låt sedan svalna.

Lös jätten i mjölken och blanda i övriga ingredienser, även den avsvagnade tangzongen. Knåda i ca 8 minuter. Det blir en ganska lös deg med tydliga glutentrådar som sedan ska jäsa till dubbel storlek, gärna i ugnen på 40 grader.

Rulla sedan så runda och släta bullar som möjligt, receptet ger 12 väldigt stora bullar eller 24 lite mer lagom stora. Bullarna ska jäsa igen – vi låt dem stå svalt över natten med mycket bra resultat. Pensla bullarna med äggula- och mjölkblandning och baka i 180 grader ca 18 minuter (mindre bullar blir klara lite fortare).

Låt bullarna svalna innan du delar dem uppifrån och ner, nästan hela vägen. Öppna och fyll rikligt med handlagen vispgräddade och släta till med en rak kant. Pudra med florsocker och avnjut din frukost med en cappuccino.



Ett svenskt 25-kvantbitschip är under utveckling.

Hur går det med kvantdatorn?

För fem år sedan skrev vi om en ny "kvantrevolution" (*Fysikaktuellt* nr 4/2018). Wallenbergs stiftelse hade då gjort en strategisk satsning för att bygga en svensk kvantdator, och sedan dess har de globala satsningarna på **kvantdatorutveckling** mångdubblats. Men vad har egentligen hänt i forskningslabben under tiden?

På dessa fem år har grunderna för kvantdatorn inte förändrats. I kvantdatorer lagras kvantinformation i kvantbitar. Där bitarna i dagens datorer är antingen noll eller ett så kan kvantbitarna försättas i en valfri superposition, det vill säga ett system som har båda tillstånden "samtidigt". När man sätter ihop N kvantbitar till ett kvantregister så kan man skapa superpositioner av alla möjliga kombinationer av noll och

ett-tillstånd. Varje N -bitars binärt tal beskriver en basvektor. För att beskriva superpositionen behöver vi 2^N komplexa tal. Detta gör att en klassisk dators minne snabbt tar slut när man försöker simulera kvantdatorer med fler än 50 kvantbitar.

Hur många kvantbitar idag?

För fem år kunde man få tillgång till system med 16 (IBM) och 19 (Rigetti Computing) kvantbitar via nätet. Dessa

kunde enkelt simuleras på till exempel en vanlig laptop. Utvecklingen av den svenska kvantdatorn i WACQT (Wallenberg Center for Quantum Technology) hade precis påbörjats. Idag erbjuder IBM tillgång till system med 133 kvantbitar, finländska IQM säljer system med 54 kvantbitar och Rigetti erbjuder datorer med 80 kvantbitar. Inom WACQT arbetar vi med finjusteringen av ett chip med 25 kvantbitar. Vi ser alltså betydligt mer komplexa

kvantdatorsystem idag än för fem år sedan och det är kommersiella aktörer som driver fältet. Alla dessa kvantdatorer bygger på supraledande kretsar. Dessutom erbjuder några företag kvantdatorer med kvantbitar baserade på jonfällor – det rör sig då om 20–30 kvantbitar. QuEra erbjuder access till ett system med 256 kvantbitar baserat på neutrala atomer i optiska pincetter.

Brus och dekoherens begränsar antalet operationer

Det finns idag alltså ett stort antal kvantdatorer med fler kvantbitar än vad som är möjligt att rättframt simulera på en klassisk dator. Men *antalet* kvantbitar är inte det enda viktiga.

I supraledande kvantdatorer är skillnaden mellan de två kvantbitstillstånden en mikrovågsfoton. Denna mikrovågsfoton kan absorberas av kringliggande material, vilket skapar ett fel i beräkningen. Att optimera både design och tillverkning för att minimera denna absorption är en pågående process. Tiden som en kvantbit kan behålla sin mikrovågsfoton kallas T1-tid eller relaxationstid. För fem år sedan var T1 för kvantbitarna vi arbetade med i WACQT i genomsnitt under 49 mikrosekunder. Idag har vi förbättrat den till i bästa fall nära 400 mikrosekunder, vilket är i världsklass för denna typ av kvantbitar, vars resonansfrekvens är fast. IBM, som använder en liknande design, redovisar till exempel en genomsnittlig T1 på 100–300 mikrosekunder för sina olika 127-kvantbitarssystem.

Kvantbitarna på Googles chip Sycamore med 53 kvantbitar, som de använde för "kvantöverlägsenhets"-experimentet 2019¹ hade en genomsnittlig T1 på 30 mikrosekunder, vilket kan låta lite. Men skillnaden är att dessa kvantbitar har ställbar resonansfrekvens och att man då kan göra mycket snabbare tvåkvantbits-operationer genom att låta två kvantbitar komma nära varandra i frekvens. Googles operationer tog ungefär 10 nanosekunder, medan vi i WACQT behöver runt 200 nanosekunder för dessa operationer.

I jonfällor kan man demonstrera koherenstider som räknas i sekunder, men tiden för operationer räknas också i mikrosekunder. Företaget Quantinuum arbetar

numera med att flytta runt jonerna under beräkningen, vilket ger snabbare operationer. I supraledande kvantbitar kopplar man vanligtvis ihop närmsta grannar i någon form av rutnät. Om man vill utföra operationer mellan två kvantbitar som ligger i olika delar av gittret måste man flytta runt kvantbitstillstånden med så kallade SWAP-operationer. Detta gör att man generellt behöver göra fler operationer i supraledande kvantdatorer än i jonfällor-kvantdatorer, där alla joner kan växelverka med alla andra.

Användbara kvantberäkningar

En perfekt fungerande kvantdator kan hitta primtalsfaktorer till stora tal med Shors algoritm². Detta innebär att man kan knäcka den så kallade RSA-krypteringen, som används allmänt för säker kommunikation på internet. För att bryta en nyckel med 2000 bitar, vilken anses säker idag, behövs en kvantdator med minst 6000 kvantbitar där man felfritt kan utföra runt 8 miljarder operationer på varje bit. Idag är antalet kvantbitar inte så långt från detta, men antalet felfria operationer, som alltså begränsas av koherenstiden, behöver förbättras med åtminstone sex-sju storleksordningar. Även om detta troligtvis ligger en bra bit in i framtiden har NIST (National Institute of Standards and Technology) redan nu tagit fram ett antal möjliga kryptosystem som skall vara säkra även mot fungerande kvantdatorer. Dessa kräver dock större beräkningskraft hos sändare och mottagare, och att byta krypteringssystem i befintliga applikationer är en dyr och långsam process.

Vad gäller kvantdynamik hos en Ising-modell med 100 spinn så har Microsoft gjort överslag som indikerar att man får en kvantfördel när man kan utföra 100 000 felfria operationer på 230 kvantbitar. Inom WACQT har vi tillsammans med vår industripartner Jeppesen analyserat hur en kvantdator skulle kunna förbättra optimeringar av vilka flygplan som flyger vilka sträckor. Här har vi kommit fram till att vi behöver 1 000–10 000 kvantbitar för att kunna testa relevanta problem. Det är mycket svårt att besvara frågan om kvantdatorn gör detta bättre än nuvarande datorer, innan vi har tillräckligt stor hårdvara att testa på. Vi kommer till liknande slutsatser när vi analyserat vilka resurser vi behöver för att simulera hur proteiner veckar sig. Dagens klassiska algoritmer bygger mycket sällan på att direkt hantera alla möjligheter i problemen, utan använder istället väl genomtänkta förenklingar. Det kommer att krävas utveckling av både hårdvara och anpassade kvantalgoritmer innan vi ser den första användbara kvantberäkningen.

Kvantinspirerade algoritmer

Idag ser vi en mycket stor aktivitet i området användbara kvantalgoritmer, inte ►

¹ Enligt en artikel i *Nature* 2019 utförde Sycamore på 200 sekunder en uppgift som uppskattades ta en vanlig superdator 10 000 år att genomföra. Goggle kallade detta att de uppnått "kvantöverlägsenhet".

² Peter Shor utvecklade 1995 en kvantdatoralgoritm som löser primtalsfaktorisering med ett endast polynomiskt ökande antal beräkningsoperationer och minne (läs mer i *Fysikaktuellt* nr 4/2018).

FOTO: IBM RESEARCH



IBM:s kvantdator Q System One, med 20 kvantbitar.

FOTO: CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLANNA-LENA LUNDQVIST



Giovanna Tancredi, som leder hårdvaru-utvecklingen av den svenska kvantdatorn i WACQT, öppnar kryostaten tillsammans med den seniora doktoranden Hangxi Li.

► minst i ett stort antal nya uppstarts-företag. I denna process omformulerar man beräkningsproblem så att de skall passa en kvantdator. Det kan ibland vara så att denna omformulering i sig ger en ny ingång till problemet, så att man kan utveckla en ny, fördelaktig klassisk algoritm. Dessa kallas kvantinspirerade algoritmer.

Felkorrigering

På längre sikt är tanken att man kodar kvantinformaten i en så kallad *logisk kvantbit* i ett antal fysiska kvantbitar genom felkorrigering koder. Beroende på vilken kod man använder och hur mycket fel de fysiska kvantbitarna har kan man behöva mellan 100 och 1 000, eller ännu fler, fysiska kvantbitar per logisk kvantbit. Fördelen är att man då kan undertrycka felsannolikheten exponentiellt och sedan utföra ett, i princip, obegränsat antal operationer. De första demonstrationerna av felkorrigering koder på 17 och 49 kvantbitar demonstrerades förra året på ETH Zürich och Google. Men det är

fortfarande långt kvar till en helt felfri logisk kvantbit.

Oanvändbara kvantalgoritmer

En intressant fråga är om en kvantdator kan räkna ut något snabbare än en klassisk dator, även om själva beräkningen inte har något annat intresse. En klass av sådana problem handlar om att skapa slumpal med en speciell sannolikhetsfördelning som är svåra att skapa med en klassisk dator. Aaronson och Arkhipov introducerade så kallad boson-sampling, där distributionen bestäms av en permanent³ till en matris. Google genererade 2019 slumpal efter en liknande fördelning med sitt 53-kvantbitars Sycamore-chip, vilket man då trodde var omöjligt att återskapa på en klassisk dator. Därefter har bland annat kinesiska grupper lyckats utveckla

³ En *permanent* av en kvadratisk matris är en funktion som liknar determinanten. Den är ett också polynom av matriselementen, men där permutaionernas signaturer inte tas med.

klassiska algoritmer baserade på tensor-nätverk som kan reproducera Googles experiment. Dock skalar problemet fortfarande exponentiellt, så ett liknande kinesiskt experiment med 60 kvantbitar påstås generera slumpal som inte går att återskapa ens med en superdator.

Stora satsningar i vår omvärld

Wallenbergs stiftelse har de senaste fem åren utökat WACQT:s årliga finansiering och dessutom förlängt satsningen från 10 till 12 år. EU:s kvantteknologiflaggskepp bygger på en medfinansiering från medlemsländerna på tillsammans 500 miljoner euro. Detta har redan överträffats med råge av flera nationella satsningar. I våras publicerade Vinnova en svensk kvantagenda som tagits fram i samarbete med Vetenskapsrådet, WACQT och RISE. Tanken är att den skall ge underlag för framtida nationella svenska satsningar på kvantteknologi.

En svensk testbädd för kvantdatorer och -algoritmer

Wallenberg har också möjliggjort skapandet av en svensk testbädd för kvantdatorer. Den har två komponenter, en kryostat för att testa kvantdatorhårdvara som redan är i drift, samt en kryostat för att testa kvantalgoritmer på en kopia av WACQTs 25-kvantbitarschip som öppnar första januari 2025. Dessutom erbjuder testbädden redan nu access till IBMs största kvantdatorer för svenska forskare och WACQTs industripartners.

Sammanfattningsvis kan vi konstatera att kvantdatorer utvecklats mycket snabbare än vad vi förutspådde för fem år sedan. Detta beror inte minst på att forskningsfinansieringen från både nationer, stora företag och riskkapital vuxit snabbare än någon vågade tro. Utvecklingen går alltså just nu mycket snabbt vilket är otroligt spännande. Dock är det inte omöjligt att vi får vänta ytterligare fem år på den första användbara kvantdatorberäkningen.

GÖRAN JOHANSSON

Professor, Tillämpad kvantfysik,
Mikroteknologi och nanovetenskap,
Chalmers tekniska högskola

Jakten på neutrinerna

Vid Fysikdagarna i Stockholm i somras hölls en tävling för bästa presentation under den allmänna postersessionen. Vinnare blev **Nils Heyer**, Uppsala universitet, med sin forskning om kosmiska neutriner.

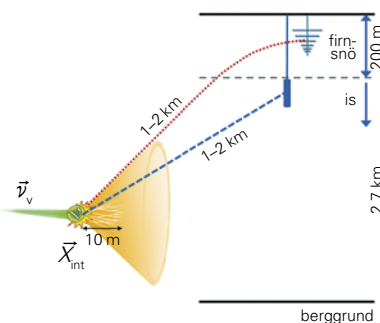
Kosmiska neutriner kan förmedla information om de mest våldsamma händelserna i universum. Olyckligtvis är de sällsynta och notoriskt svåra att upptäcka. För att hitta dem behövs stora detektorer i till exempel polarisen eller inlandsisen. Men hur kan vi identifiera och förstå de signaler som neutrinerna lämnar i våra detektorer?

Neutriner hör egentligen till de vanligaste partiklarna i universum. Sannolikheten för att de ska växelverka med vanlig materia är dock utomordentligt låg. Dessutom minskar deras förekomst kraftigt vid höga energier. För att hitta ens några få ultrahögenergetiska neutriner under ett årtionde behövs detektorer med en volym på hundratals kubikkilometer. Sådana detektorer är under utveckling på Grönland (Radio Neutrino Observatory) och vid Sydpolen (IceCube-Gen2 Radio), och de kommer att använda isen som detektormaterial.

Om en neutrino med en energi på 10^{18} eV, alltså miljontals gånger högre än den som kan alstras av våra kraftfullaste accelerators, krockar med en atom i detektorns volym skapas en skur av sekundära partiklar. Det uppstår en laddningsfördelning när skuren rör sig genom isen. Genom den så kallade Askaryan-effekten bildas då koherenta radiosignaler. Genom att placera ut en gles grupp av radioantennerna på isytan kan man upptäcka dessa signaler och dra slutsatser om neutrinons energi och riktning.

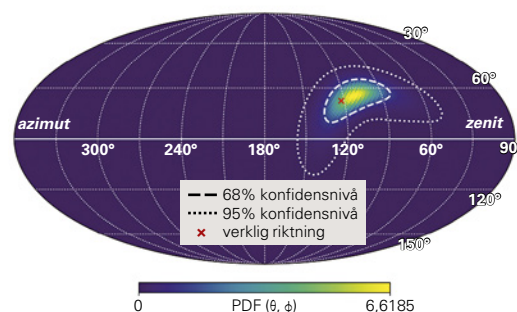
VANLIGTVIS KOMMER EN SIGNAL från en neutrinohändelse att registreras av ett litet kluster av antenner. Ur denna mycket begränsade mängd data måste sedan alla relevanta egenskaper rekonstrueras.

Först måste ett beslut fattas om signalen verkligen kommer från en neutrino-inducerad händelse eller från en av många



Skiss av Askaryan-strålning i is. Dimensionerna visas för ett typiskt fall vid Sydpolen.

(BARWICK & GLASER 2022)



Sannolikhetstäthetsfördelning för neutrinoriktningen på himmelssfären för en simulerad neutrinohändelse. Konfidensnivåerna 68% och 95% visas, liksom den verkliga riktningen för händelsen.

möjliga bakgrundsprocesser, till exempel från kosmisk strålning.

För det andra måste neutrinoegenskaperna extraheras. Särskilt intressanta är neutrinons energi, riktning och typ. Energin är av intresse eftersom den kan bekräfta eller utesluta de teoretiska förväntningar vi har för kosmiska neutriner som når jorden. Neutrinons riktning är särskilt spännande eftersom den pekar direkt mot neutrinons ursprungskälla.

Teorierna lyfter fram de mest energitäta objekten och de mest våldsamma händelserna i universum, som till exempel aktiva galaxkärnor och gammautbrottskällor. Neutrinons typ kan bidra till att ytterligare förstå de processer som alstrade neutrinon.

FÖR ATT UTFÖRA DENNA rekonstruktion av neutrinohändelserna utvecklas tekniker baserade på djupinlärning. Man använder moderna maskininlärningsmetoder, som flerlayers neuronnät och villkorliga normaliseringsflöden, för att analysera de signaler som mäts i radioantennerna. I likhet med djupinlärning vid bildigenkänning känner neuronnäten igen tidskorrelerade mönster i signalerna,

och det villkorliga normaliseringsflödet förutsäger den mest sannolika energin och riktningen. Den erhållna sannolikhetsdensitetsfunktionen gör det också möjligt att uppskatta osäkerheten i den rekonstruerade energin/riktningen för varje enskild händelse.

Dessa spännande nya analysmetoder kommer att göra det möjligt att göra mer exakta mätningar och potentiellt även avslöja hemligheterna i högenergetiska processer i universum.

NILS HEYER

Doktorand vid Institutionen för fysik och astronomi, Uppsala universitet

Läs mer

N. Heyer, C. Glaser, T. Glüsenskamp for the IceCube-Gen2 collaboration, "Deep Learning Based Event Reconstruction for the IceCube-Gen2 Radio Detector" (2023), *PoS(ICRC2023)*1102

S. Barwick, C. Glaser, "Radio Detection of High Energy Neutrinos in Ice" (2022), arXiv:2208.04971

T. Glüsenskamp, "Unifying supervised learning and VAEs - coverage, systematics and goodness-of-fit in normalizing-flow based neural network models for astro-particle reconstructions" (2023), arXiv:2008.05825

En historia med spets

En **kulspetspenna** kan vara en plastpenna med eller utan företagslogotyp, eller kanske en snyggare penna i metall med ens namn ingraverat.

Pennan ska ha lagom friktion mot papperet, bläcket flöda jämnt, lagom fort och torka tillräckligt snabbt, samtidigt som bläcket i pennan inte torkar ut eller tar slut. Hur uppnås detta?

Gåspennor

Förr användes olika former av vassa och hårda ritverktyg för att göra ristningar i sten, ben, lera eller vax. När papyrus blev tillgängligt i Egypten omkring 400 f.Kr. kunde man använda pennor av tillskuren vass, som doppades i färgad vätska, så som gjorts bland annat på Dödahavsrullarna.

Spetsen blir tyvärr snabbt slö och vingpennor började i stället användas av romarna under 300-talet e.Kr., då man skrev på renskrapade djurhudar, så kallat pergament. För att göra en penna (latin för fjäder) skar man oftast till en gåsfjäder. Sedan doppade man spetsen i bläck, som vid den tiden framställdes av bland annat gallussyra och metallsalter. Med vingpennor kunde man forma linjer med varierad bredd.

Stålpennor

Under 1700-talet gjordes pennor av tunn stålplåt fastsatt i ett träskaft.

Metallspetsar var dock styva och korroderade på grund av dåtidens bläck.

Först på 1830-talet dök spetsar med slitsar upp, vilket fick bläcket att flyta jämnare. Det var ändå svårt att få till jämna linjer, eftersom bläcket på pennan efter en stunds skrivande tog slut, varpå pennan ånyo måste doppas i bläck. Bläcket torkade långsamt och läskpapper var nödvändigt, något jag kämpade med under mina första skolår.

Reservoarpennor

Tanken att ha en utbytbar eller påfyllningsbar behållare i pennskaf-



FIGUR 1 Till vänster kula av nötningsstål- kiselkarbid eller volframkarbid (cirka 9 på Mohs hårdhetsskala). Till höger kula av plast till en deodorant.

vet resulterade i reservoarpennan. Många varianter på behållare lär ha funnits. År 1710 dyker *fountain pen* (reservoarpenna) upp i Oxford English Dictionary. Det första patentet utfärdades i Frankrike 1827 till rumänen Poenaru, och amerikanen Waterman tillverkade 1884 den första väl fungerande reservoarpennan.

Enligt Plateau-Rayleighs instabilitet bryts en vertikalt fallande stråle av icke-viskös vätska med cirkulärt tvärsnitt upp i droppar om dess längd överstiger dess omkrets. Waterman reglerade bläckflödet genom att i pennspetsen lägga in tunna kanaler, så att luft kunde strömma förbi och ge tryckbalans i pennan. Reservoarpennan har flexibel spets som ger möjlighet till olika linjebredder och kan därför användas till kalligrafi, det vill säga konsten att skriva vackert (från grekiskans *kallos*, skönhet och *graphos*, skriva). Bläcket är vattenbaserat och kan tyvärr droppa eller smeta, och refillen kan läcka.

Kulspetspennor

Kulspetspennor har en metallkula i pennspetsen som fungerar som en ventil, vilken förhindrar läckage. Bläcket kan bara rinna ut när tryck appliceras på kulan och den

rullar över papperet. Likadant fungerar en deodorant med roll-on (figur 1). Bläcket innehåller en blandning av fettsyror och alkohol, där fett smörjer kulan och alkoholen säkrar flödet.

Kulspetspennan var en välsignelse i skolan, ingen stålpenna, inget bläckhorn, inga bläckfläckar och inget läskpapper. Det första patentet på en penna med kulspets utfärdades i USA redan 1888 och fram till 1930-talet utvecklades flera mindre lyckade varianter. Pennan utnyttjade gravitationen och behövde därför hållas lodrätt mot papperet. Ungraren Bíró ändrade geometrin för att kunna utnyttja kapillärkraften, och hans bror införde ett mer snabbtorkande bläck. De tog 1938 ut patent i Frankrike och Schweiz, men flydde där efter undan nazisterna till Argentina. Där fick de 1943 patent på sin nya konstruktion. De sålde 1946 det amerikanska patentet till Eurosharp Faber och det europeiska patentet till Marcel Bich, som började tillverka billiga pennor med varunamnet BIC.

Rollerball- och gelpennor

Rollerballpennan lanserades 1963 av den japanska firman Ohto. Den kombinerar det lättflytande bläcket hos en reservoarpenna med kulspetspennans skrivmekanism. Samma mekanism har gelpennan, som presenterades 1982 av den japanska firman Sakura.

Från penna till papper

Kulans rullfriktion mot underlaget måste vara mindre än glidfriktionen och större än friktionen för kulan i hylsan, annars rullar den inte. Kulor finns som 0,2–1,5 mm, medan utrymmet mellan hylsa och kula bara är några mikrometer.

Bläcket måste flöda ner till kulan tillräckligt snabbt och därför får bläckets viskositet (η) inte vara för hög.



FOTO: AUCLAND MUSEUM

Kulspetspennans oljebaserade bläck är mer trögflytande, $\eta = 10\text{--}25 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, än det vattenbaserade rollerballbläcket, $\eta = 3\text{--}4 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, medan viskositeten hos det likaledes vattenbaserade gelbläcket ligger någonstans mellan dessa. Vatten har som jämförelse $\eta = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$.

Ytspänningen avgör hur bläcket uppför sig på en yta. Är den för hög hamnar bläcket ojämnt på både kula och papper. Är ytspänningen för låg, kommer bläcket flyta ut för mycket och får svårt att fästa. Ytspänningen (γ) för kulspetsbläck är $\gamma = 43 \text{ mN/m}$ och för rollerballbläck, $\gamma = 38 \text{ mN/m}$, som därför lättare tränger in i papperet och i värsta fall igenom. Gelbläck med $\gamma > 40 \text{ mN/m}$ tränger inte genom papperet så lätt som rollerballbläck. Ytspänningen för vatten är som jämförelse $\gamma = 72 \text{ mN/m}$.

Den höga viskositeten hos kulbläck kräver att pennan trycks ner, vilket gör den lätt att kontrollera, vilket kan ge kramp i handen. Pennor med rollerballbläck eller gelbläck behöver knappt tryckas ner alls, men åstadkommer ibland ej avsedda krumelurer.

När bläcket hamnat på papperet ska det helst torka snabbt. Kulbläck har alkohol som lösningsmedel, så det torkar nästan omedelbart och kladdar sällan. Rollerballbläck är vattenbaserat och tar lite längre tid att torka. Det kladdar därför lättare, speciellt på glatt papper. Den höga viskositeten och låga ytspänningen gör att det lätt blir en bläckplump (inte typ Rorschach¹), om man råkar hålla pennan stilla, speciellt mot papper av låg kvalitet. Även gelbläck torkar långsamt och kan kladda.

Jag lät en vänsterhänt testa pennorna i figur 2. Reservoarbläck kladdade som väntat, rollerball- och gelbläck aningen och kulspetsbläck inte alls.

Rollerballpennor är dessutom känsliga för uttorkning och därför skyddas patronen nästan alltid av en huv i stället för en tryck- eller vridmekanism. Utan huv kan bläcket dessutom kladda i väskor och fickor. Rollerball och gelpennor



FIGUR 2 Fyra vanliga pennor. Från vänster reservoar-, kulspets-, rollerball- och gelpenna.

ger fylligare linjer än kulspetsen, vilket innebär att deras bläck ofta tar slut snabbare än kulspetsbläck. Kulspetspennan BIC M10 Original utlovar med 0,32 mm breda linjer en skrivlängd på 2 000 m. Patronen har 3 mm innerdiameter och längd 10 cm, vilket ger tjockleken 11 nm på linjen. Antingen är skrivlängden kortare eller bläckvolymen mindre, ty tjockleken synes osannolikt liten.

Försöken att framställa ett vattenbaserat bläck, som tränger in mindre djupt i papperet än rollerballbläck, kröntes 1982 med framgång. Det japanska företaget Sakura råkade testa ett förtjockningsmedel (xanthangummi) som används i geléer och soppor. Detta gelbläck flödar nästan lika lätt som rollerballbläck. Dessutom kan det innehålla pigment, medan flytande bläck är begränsat till färgämnen, eftersom pigment skulle sedimentera. Det ger fylligare färger med många fler nyanser att välja mellan.

Enligt Giftinformationscentralen är kulspets- och bläckpennor ofarliga att suga på.

Utsatta områden

Reservoarpennorna, som de brittiska flygarna använde under andra världskriget, läckte eller tog slut på hög höjd. Det brittiska flygvapnet fick 1943 höra om Birós penna, köpte licensrätten och började tillverka pennor åt sina och de allierades besättningar. Där blev de snabbt populära under namnet *biro*, vilket de fortfarande kallas i England. Även i dag kan reservoar-pennor läcka i flygplan. Den försiktige förvarar pennan upprätt och ser till att ha den fylld, ty när det omgivande trycket sjunker expanderar eventuell luft i bläckpatronen.

Trycket sänks i en flygplanskabin för att inte materialet i flygkroppen ska utmattas efter alla uppstigningar och landningar.

NASA oroade sig för funktionen i mikro-g miljöer och sedan 1969 har deras rymdfarare pennor, som har en med kväve trycksatt patron och ett mycket trögflytande bläck. Runt 2003 visade emellertid en ESA-astronaut att en vanlig kulspetspenna fungerade i rymdstationen ISS.

Viskositeten ökar och ytspänningen minskar vid sänkt temperatur. Jag testade därför pennorna i figur 2, och efter en natt i frysen (-15°C) fungerade pennorna ändå klanderfritt.

Miljöpennalism

Sedan 1950-talet har nära 100 miljarder kulspetspennor tillverkats, inklusive Bic Cristal, vilken räknas som världens mest sålda. Självt har jag, i likhet med många andra, irriterat kastat ett antal icke-fungerande pennor. De allra flesta kastade pennor lär återfinnas i deponier. Dessbättre använder tillverkarna numera alltmer återvunnen plast och även papp samt erbjuder refiller.

Underskrift

Viktiga handlingar bör utfärdas på arkivbeständigt papper med vattenstämpel *Svenskt Arkiv* och undertecknas med arkivbeständigt bläck certifierat *Svenskt Arkiv*. Sådant bläck består huvudsakligen av gallussyra och ett tvåvärt järnsalt och är mycket ljusbeständigt. Än mer (ljus)beständig är en digital signering om EU-förordningen eIDAS efterlevs.

MAX KESSELBERG
Stockholms universitet

¹ Den schweiziske psykiatern *Rorschachs* test, består av symmetriska bläckplumpar, som testpersonen ska tolka.



NATUR & KULTUR

Upptäck och utforska med Stella

Miss inte vår nya stjärna Stella – en heltäckande läromedelsserie i NO och Teknik för år 7–9.

- Struktur som underlättar terminsplaneringen
- Språkutvecklande
- Tydliga förklaringsmodeller
- Systematiska undersökningar
- Källkritiskt perspektiv

**Gör det
komplicerade
begripligt**



Tryckt och digitalt i ett paket!

Stella finns även som digitalt läromedel med smarta funktioner för både lärare och elev. Nu kan du beställa Stella som paket och få det digitala läromedlet tillsammans med den tryckta boken – helt utan extra kostnad.



Läs mer på nok.se/stella